



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA KOORDINASI PROTEKSI AKIBAT PEMASANGAN
HYBRID SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER
(SFCL) DI PT. AJINOMOTO INDONESIA**

Bagus Wahyu Santoso
NRP 2214105068

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***ANALYSIS COORDINATION PROTECTION DUE TO
INSTALLATION OF HYBRID SUPERCONDUCTING FAULT
CURRENT LIMITER (SFCL) ON PT. AJINOMOTO INDONESIA***

Bagus Wahyu Santoso
NRP 2214105068

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Danar Fahmi, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **Analisa Koordinasi Proteksi Akibat Pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) Di PT. Ajinomoto Indonesia**, adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Bagus Wahyu Santoso
Nrp. 2214105068

**ANALISA KOORDINASI PROTEKSI AKIBAT
PEMASANGAN *HYBRID SUPERCONDUCTING*
FAULT CURRENT LIMITER (SFCL)
DI PT. AJINOMOTO INDONESIA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiatara, M.T.
NIP. 196603181990101001

Dosen Pembimbing II

Danar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



ANALISA KOORDINASI PROTEKSI AKIBAT PEMASANGAN *HYBRID SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER (SFCL)* DI PT. AJINOMOTO INDONESIA

Nama Mahasiswa : Bagus Wahyu Santoso
Nrp : 2214105068
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP : 196603181990101001
Dosen Pembimbing : Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP : 198909252014041002

ABSTRAK

Penambahan daya dan interkoneksi sistem jaringan listrik di PT. Ajinomoto Indonesia mengakibatkan arus gangguan hubung singkat menjadi lebih tinggi dari level sebelum adanya penambahan daya dan interkoneksi jaringan. Arus tersebut dapat melampaui *device capability* peralatan sistem sehingga dapat merusak peralatan. Agar penggantian peralatan *existing* tidak dilakukan, maka arus gangguan hubung singkat harus diminimalisir agar nilainya dibawah *level device capability* peralatan. *Hybrid SFCL* digunakan untuk mereduksi arus gangguan pada sistem.

Saat terjadi gangguan sebelum pemasangan *Hybrid SFCL* arus hubung singkat maksimum 3 fasa simetri $\frac{1}{2}$ cycle pada bus 52S1 dan 52S2 sebesar 51,1 kA dan 67 kA, *rating bracing rms device capability* sebesar 40 kA. Setelah pemasangan *Hybrid SFCL* dengan impedansi sebesar $0,028 \Omega$ untuk bus 52S1, nilai arus gangguan berkurang dari 51,1 kA menjadi 35 kA. Untuk bus 52S2 dengan impedansi sebesar $0,2 \Omega$, nilai arus gangguan berkurang dari 67 kA menjadi 34,9 kA. Penambahan *Hybrid SFCL* mengakibatkan arus hubung singkat turun, sehingga dilakukan *resetting* untuk *proteksi* rele arus lebih. Hasil koordinasi ditampilkan dalam bentuk kurva *Time Current Curve (TCC)*.

Dengan pemasangan *Hybrid SFCL* dapat memperkecil arus hubung singkat dan sebagai pengaman peralatan listrik serta dapat meminimalisir pengeluaran biaya untuk penggantian peralatan listrik.

Kata Kunci : *Hybrid SFCL*, Koordinasi Proteksi, Rele Arus Lebih.

-Halaman ini sengaja dikosongkan-

ANALYSIS COORDINATION PROTECTION DUE TO INSTALLATION OF HYBRID SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER (SFCL) ON PT. AJINOMOTO INDONESIA

Name : Bagus Wahyu Santoso
NRP : 2214105068
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP : 196603181990101001
Advisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP : 198909252014041002

ABSTRACT

Extra power and interconnection the electrical grid system in PT. Ajinomoto Indonesia can result a short circuit fault current becomes higher than the level before the addition of the generator and network interconnection. These currents can exceed the device capability of system equipment so that it can damage the equipment. In order for the replacement of existing equipment is not done, then the short circuit fault current must be minimized so that the value below the level of device capability equipment. Hybrid SFCL used to reduce short circuit fault current in the system.

When an interruption occurs prior to the installation of Hybrid SFCL maximum short circuit current of 3 phase symmetry 1/2 cycle on the bus 52S1 and 52S2 51.1 kA and 67 kA, rms bracing device capability rating of 40 kA. After the installation of Hybrid SFCL with an impedance of 0.028Ω to bus 52S1, fault current value decreased from 51.1 kA to 35 kA. For bus 52S2 with an impedance of 0.2Ω , the current rating of 67 kA reduced interference becomes 34.9 kA. Addition of Hybrid SFCL resulting in short-circuit current decline, so do resetting relay for overcurrent protection. The coordination displayed in the form of Time Current Curve (TCC).

With the installation of Hybrid SFCL can reduce short-circuit current and the electrical equipment safety and to minimize expenses for the replacement of electrical equipment.

Keywords: *Superconducting Fault Current Limiter, Overcurrent relay*

-Halaman ini sengaja dikosongkan-

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT, serta shalawat dan salam sentiasa terlimpahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis memiliki kemampuan untuk menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

“Analisa Koordinasi Proteksi Akibat Pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) Di PT. Ajinomoto Indonesia”

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang masih memperkenankan kepada penulis terlebih lagi atas kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta dan keluarga yang telah memberikan dorongan semangat baik moral maupun material.
3. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Daniar Fahmi, ST., MT. sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
5. Aprillia Intan Kusumawati dan seluruh teman – teman Lintas Jalur angkatan 2014 yang banyak membantu dan selalu memberikan semangat.
6. Seluruh pihak yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

-Halaman ini sengaja dikosongkan-

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	1
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Tugas Akhir	2
1.5. Metodologi	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	4

BAB II DASAR TEORI

2.1. Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Gangguan Hubung Singkat	5
2.1.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri	6
2.1.1.2 Gangguan Hubung Singkat Tak Simetri	6
2.1.2 Gangguan Beban Lebih	9
2.2. Sistem Pengaman Tenaga Listrik	9
2.2.1 Rele Arus Lebih (<i>Overcurrent Relay</i>)	10
2.2.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (<i>Definite Time</i>)	12
2.2.1.2 Rele Arus Lebih Seketika (<i>Instantaneous</i>)	12
2.2.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (<i>Inverse Time</i>)	13
2.3. <i>Superconductor Fault Current Limiter</i> (SFCL)	15
2.4. <i>Hybrid Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL)	16
2.4.1 Kondisi Operasi Normal	18
2.4.2 <i>Sensing</i> Adanya Gangguan	19
2.4.3 Kondisi Terjadinya Gangguan Setelah <i>Coil</i> Aktif	19
2.5. Pemasangan <i>Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL)	20
2.5.1 Operasi Parallel Dengan 2 Sistem dan <i>Feeder</i> Keluaran	20

2.5.2 Perhitungan <i>Desain Current Limiting Reactor</i>	21
--	----

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. AJINOMOTO INDONESIA

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia	23
3.2 <i>Single Line Diagram</i> PT. Ajinomoto Indonesia.....	24
3.3 Kapasitas Pembangkitan PT. Ajinomoto Indonesia	24
3.4 Data Transformator PT. Ajinomoto Indonesia.....	24
3.5 Data Beban PT. Ajinomoto Indonesia.....	25
3.6 Data Kabel PT. Ajinomoto Indonesia	30
3.7 Data <i>Rating Switchgear</i> PT. Ajinomoto Indonesia	31
3.8 Permodelan <i>Hybrid SFCL</i>	32

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS PADA PT. AJINOMOTO INDONESIA

4.1 Analisis Hubung Singkat dan Kemampuan Peralatan	33
4.2 Perhitungan Nilai Reaktansi <i>Current Limiter Reactor</i>	39
4.3 Cara Kerja SFCL	41
4.4 Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa.....	46
4.4.1 Pemilihan Tipikal Koordinasi	47
4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1	47
4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2	59
4.4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3	71
4.4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 4	82

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	101
5.2. Saran	102

DAFTAR PUSTAKA	103
-----------------------------	-----

BIODATA PENULIS	105
------------------------------	-----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gambar Rangkaian Hubung Singkat Tiga Fasa.....	6
Gambar 2.2	Gambar Rangkaian Hubung Singkat Dua Fasa	7
Gambar 2.3	Gambar Rangkaian Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah	8
Gambar 2.4	Gambar Rangkaian Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah	8
Gambar 2.5	Skema Konsep Kerja Rele	9
Gambar 2.6	Kurva Karakteristik <i>Definite Time</i>	12
Gambar 2.7	Kurva Karakteristik <i>Instantaneous</i>	13
Gambar 2.8	Karakteristik Macam Kurva <i>inverse</i> Berdasarkan IEEE 242-2001	14
Gambar 2.9	Gelombang Pereduksian Arus Oleh SFCL.....	16
Gambar 2.10	Perubahan Inovasi dari <i>Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL).....	17
Gambar 2.11	Rangkaian <i>Hybrid Superconducting Fault Current Limiter</i> (SFCL).....	18
Gambar 2.12	<i>Hybrid</i> SFCL Kondisi Operasi Normal.....	18
Gambar 2.13	<i>Hybrid</i> SFCL Kondisi <i>Sensing</i> Ketika Terjadi Arus Gangguan	19
Gambar 2.14	<i>Hybrid</i> SFCL Kondisi Terjadi Gangguan Setelah <i>Coil</i> Aktif.....	20
Gambar 2.15	Pemasangan <i>Superconducting Fault Current Limiter</i> ...	21
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia	24
Gambar 3.2	Permodelan <i>Hybrid</i> SFCL.....	32
Gambar 4.1	Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52S1.....	35
Gambar 4.2	Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52S2.....	36
Gambar 4.3	Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52GR2	37
Gambar 4.4	Nilai Arus Kontribusi Pada Bus – G.....	38
Gambar 4.5	Lokasi pemasangan <i>Hybrid</i> SFCL.....	39
Gambar 4.6	Gelombang <i>Hybrid</i> SFCL	41
Gambar 4.7	Grafik Arus Hubung Singkat Bus 52S1	42
Gambar 4.8	Grafik Arus Hubung Singkat Bus 52S2	43
Gambar 4.9	Skema Koordinasi Rele Arus Lebih PT. Ajinomoto Indonesia.....	47
Gambar 4.10	<i>Single Line Diagram</i> Koordinasi Rele Tipikal 1	48
Gambar 4.11	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 1	50

Gambar 4.12	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 1	57
Gambar 4.13	Data Urutan Kerja Rele Hasil <i>Resetting</i> Tipikal 1	58
Gambar 4.14	<i>Sequence Viewer</i> Tipikal 1	58
Gambar 4.15	<i>Single Line Diagram</i> Koordinasi Rele Tipikal 2.....	60
Gambar 4.16	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 2.....	62
Gambar 4.17	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 2.....	69
Gambar 4.18	Data Urutan Kerja Rele Hasil <i>Resetting</i> Tipikal 2	70
Gambar 4.19	<i>Sequence Viewer</i> Tipikal 2	70
Gambar 4.20	<i>Single Line Diagram</i> Koordinasi Rele Tipikal 3.....	72
Gambar 4.21	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 3.....	74
Gambar 4.22	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 3.....	80
Gambar 4.23	Data Urutan Kerja Rele Hasil <i>Resetting</i> Tipikal 3	81
Gambar 4.24	<i>Sequence Viewer</i> Tipikal 3	81
Gambar 4.25	<i>Single Line Diagram</i> Koordinasi Rele Tipikal 4.....	83
Gambar 4.26	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 4.....	85
Gambar 4.27	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 4.....	93
Gambar 4.28	Data Urutan Kerja Rele Hasil <i>Resetting</i> Tipikal 3	94
Gambar 4.29	<i>Sequence Viewer</i> Tipikal 4	94

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Pembangkit Listrik di PT. Ajinomoto Indonesia.....	24
Tabel 3.2	Data Transformator di PT. Ajinomoto Indonesia.....	25
Tabel 3.3	Data Pembebanan Masing – Masing <i>Feeder</i>	26
Tabel 3.4	Data Beban Motor dan <i>Lump Load</i> PT. Ajinomoto	26
Tabel 3.5	Data Kabel PT. Ajinomoto Indonesia	30
Tabel 3.6	Data <i>Rating Switchgear</i> PT. Ajinomoto Indonesia	31
Tabel 4.1	Data perbandingan kemampuan <i>bus</i> 3.45 kV dengan I _{SC} maksimum 3 fasa pada kondisi ½ cycle	34
Tabel 4.2	Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus 52S1	35
Tabel 4.3	Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus 52S2	36
Tabel 4.4	Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus 52GR2	37
Tabel 4.5	Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus–G	38
Tabel 4.6	Data Arus Hubung Singkat ½ Cycle <i>Asymetri Rms</i> Kontribusi Trafo Sebelum dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid SFCL</i>	43
Tabel 4.7	Data Arus Hubung Singkat ½ Cycle <i>Symetri Rms</i> Sebelum dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid SFCL</i>	44
Tabel 4.8	Data Arus Hubung Singkat ½ Cycle <i>Asymetri Rms</i> Sebelum dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid SFCL</i>	44
Tabel 4.9	Data Arus Hubung Singkat ½ Cycle <i>Asymetri Peak</i> Sebelum dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid SFCL</i>	45
Tabel 4.10	Data Arus Hubung Singkat 3 Fasa 4 Cycle Pada Rele	45
Tabel 4.11	Data Arus Hubung Singkat <i>Line to Line</i> 30 Cycle Pada Rele	46
Tabel 4.12	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 1	49
Tabel 4.13	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 1	56
Tabel 4.14	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 2	61
Tabel 4.15	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 2	68
Tabel 4.16	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 3	73
Tabel 4.17	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 3	79
Tabel 4.18	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 4	84
Tabel 4.19	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 4	92
Tabel 4.20	Data Perbandingan <i>Setting</i> Rele Tipikal 1 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid SFCL</i>	96

Tabel 4.21	Data Perbandingan <i>Setting</i> Rele Tipikal 2 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid</i> SFCL.....	97
Tabel 4.22	Data Perbandingan <i>Setting</i> Rele Tipikal 3 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid</i> SFCL.....	98
Tabel 4.23	Data Perbandingan <i>Setting</i> Rele Tipikal 4 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan <i>Hybrid</i> SFCL.....	99

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan beban di PT. Ajinomoto Indonesia, maka diperlukan penambahan daya listrik pada sistem agar pelayanan listrik dapat tetap kontinyu. Salah satu cara adalah dengan menambah generator yang terhubung pada sistem dan melakukan interkoneksi jaringan. Bertambahnya generator pada sistem dan interkoneksi jaringan, akan memberikan beberapa dampak. Salah satunya adalah mengakibatkan kenaikan arus gangguan hubung singkat menjadi lebih tinggi dari level sebelum adanya penambahan generator dan interkoneksi jaringan. Arus gangguan hubung singkat tersebut dapat melampaui *device capability* peralatan sistem sehingga dapat merusak peralatan serta mengakibatkan kegagalan sistem kelistrikan dalam penyaluran daya.

Agar penggantian peralatan *existing* tidak dilakukan, maka arus gangguan hubung singkat harus diminimalisir agar nilainya dibawah level kemampuan peralatan yang ada. Dalam membatasi arus lebih akibat hubung singkat yang menuju ke titik gangguan terdapat beberapa solusi yang dapat digunakan salah satunya dengan memasang *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) yang akan diletakkan pada bus yang mendekati titik kritis.

Pada Tugas Akhir ini *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) yang digunakan adalah *Hybrid* SFCL. Dengan menggunakan *Hybrid* SFCL maka arus gangguan yang terjadi akan dengan cepat di reduksi dengan memanfaatkan reaktansi dari *Current Limiting Reactor* (CLR) yang terhubung paralel dengan *High Temperature Superconductor* (HTS) sehingga dapat mengamankan seluruh peralatan dan sistem kelistrikan dari pemadaman total. Dengan pemasangan *Hybrid* SFCL diharapkan dapat memperkecil arus hubung singkat dan pengaman peralatan listrik serta dapat meminimalisir pengeluaran biaya untuk penggantian peralatan listrik. Analisa hubung singkat serta studi koordinasi ditunjukkan dalam bentuk kurva *Time Current Characteristic* (TCC).

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana arus hubung singkat sebelum pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL)?
2. Bagaimana cara kerja *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL)?
3. Bagaimana arus hubung singkat setelah pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) yang tepat untuk membatasi arus hubung singkat yang mengalir ke titik gangguan?
4. Bagaimana koordinasi proteksi rele arus lebih untuk gangguan fasa setelah pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL)?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Analisa hubung singkat yang dilakukan adalah 3 *phase fault* dan *line to line* pada $\frac{1}{2}$ cycle, 4 cycle dan 30 cycle.
2. Pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) pada busbar yang paling kritis untuk membatasi arus hubung singkat.
3. Koordinasi Proteksi yang dilakukan adalah koordinasi proteksi rele arus lebih untuk gangguan fasa.

1.4 Tujuan

Tugas Akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui arus hubung singkat sebelum pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).
2. Mengetahui cara kerja *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).
3. Mengetahui arus hubung singkat setelah pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).
4. Mengetahui cara mengatur koordinasi rele arus lebih untuk gangguan fasa setelah pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) di PT Ajinomoto Indonesia.

1.5 Metode Penelitian

Metode yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Mencari literatur dan ide yang berhubungan dengan tugas akhir. Literatur yang diperlukan meliputi karakteristik *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL), analisa hubung singkat 3 fasa dan *line to line* serta koordinasi rele arus lebih pada sistem kelistrikan.

2. Pengumpulan Data

Melakukan pengumpulan data – data mengenai sistem kelistrikan PT Ajinomoto Indonesia meliputi *single line diagram* serta data-data peralatan seperti *rating* generator, trafo, motor, bus, *setting* rele arus lebih dan lainnya.

3. Permodelan Sistem dan Simulasi

Melakukan permodelan dan simulasi sistem kelistrikan berdasarkan hasil pengumpulan data.

4. Analisa Data Arus Hubung Singkat

Analisis yang dilakukan yaitu analisa hubung singkat untuk mengetahui dimana *busbar* yang mengalami arus hubung singkat dengan nilai terbesar dan apakah *busbar* tersebut mampu menahan arus hubung singkat atau tidak. Sehingga dari analisis dapat diketahui *busbar* tersebut perlu di pasang *Hybrid* SFCL atau tidak untuk membatasi arus hubung singkat yang terjadi. Dilakukan analisis efek pemasangan *Hybrid* SFCL pada koordinasi proteksi rele arus lebih.

5. Kesimpulan

Dari analisis permodelan sistem kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia, akan diperoleh kesimpulan mengenai pemakaian *Hybrid* SFCL sebagai pereduksi arus hubung singkat pada sistem kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia dan koordinasi proteksi rele arus lebih yang tepat pada sistem kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia setelah pemasangan *Hybrid* SFCL.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

BAB II : Dasar Teori

Bab ini secara garis besar membahas gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan, penjelasan mengenai sistem pengaman, dan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).

BAB III : Sistem Kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia.

Bab ini membahas sistem kelistrikan dan spesifikasi pembangkit serta beban pada PT. Ajinomoto Indonesia.

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas data hasil arus gangguan hubung singkat pada bus dan analisa penempatan pemasangan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) serta menentukan koordinasi rele arus lebih setelah pemasangan *Hybrid* SFCL.

BAB V : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi perusahaan di bidang industri untuk mendesain dan menggunakan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) sebagai pengaman bila terjadi penambahan kapasitas daya atau interkoneksi jaringan listrik tanpa melakukan penggantian peralatan *existing* seperti *switchgear* dan *circuit breaker* yang sebelumnya telah terpasang.
2. Dapat dijadikan referensi untuk pengembangan pemodelan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik[1]

Gangguan pada sistem tenaga listrik menunjukkan suatu keadaan tidak normal yang mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Berdasarkan asalnya, terdapat dua macam gangguan yaitu:

1. Gangguan berasal dari dalam sistem

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain disebabkan oleh kesalahan mekanis yaitu terjadi karena proses penuaan atau karena kerusakan material seperti kawat putus, isolator pecah, retaknya *bearing*, dll, Pemasangan yang kurang baik, tegangan dan arus tidak normal pada sistem serta beban yang melebihi kapasitas sistem.

2. Gangguan berasal dari luar sistem

Gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir, pengaruh lingkungan antara lain pohon tumbang, benda asing jatuh, dan juga akibat kecerobohan manusia. Pada gangguan surja petir dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus pada isolasi peralatan (*breakdown*).

Berdasarkan sifat gangguan, maka jenis gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2 yaitu:

1. Gangguan sementara (*temporary*)

Menunjukkan gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau pada bagian yang terganggu diputus secara sesaat dari sumber tegangannya.

2. Gangguan permanen (*stationary*)

Menunjukkan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga telah terbuka. Untuk menghilangkan gangguan permanen diperlukan tindakan perbaikan pada titik penyebab gangguan tersebut.

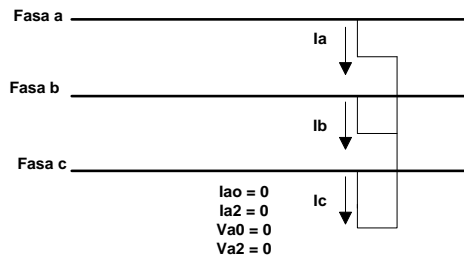
2.1.1 Gangguan Hubung Singkat[2]

Gangguan ini disebabkan karena adanya saluran fasa yang terhubung dengan saluran fasa lainnya atau terhubung dengan *ground*. Gangguan ini dapat menyebabkan terjadinya arus yang sangat besar sehingga dapat merusak peralatan listrik yang ada di sekitar titik gangguan. Besarnya arus gangguan hubung singkat dapat ditentukan

berdasarkan impedansi dari peralatan listrik pada sistem tersebut. Gangguan hubung singkat digolongkan menjadi dua, yaitu:

2.1.1.1 Gangguan hubung singkat simetri[3]

Gangguan hubung singkat simetri atau disebut gangguan hubung singkat seimbang yaitu gangguan yang terjadi pada semua fasanya, sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan komponen urutan positif. Gambar rangkaian hubung singkat tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa [3]

Besarnya arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung dengan persamaan 2.1 berikut:

$$I_{sc\ 3\phi} = \frac{V_{LN}}{x_1} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

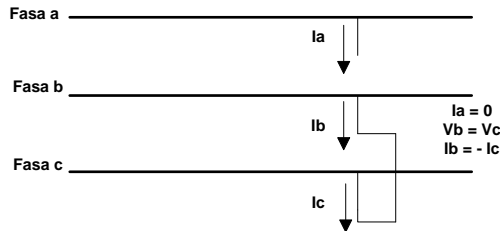
- $I_{sc\ 3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa
- V_{LN} : tegangan nominal *line to netral*
- x_1 : reaktansi urutan positif

2.1.1.2 Gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri) [3]

Gangguan hubung singkat asimetri atau disebut gangguan tidak seimbang yaitu gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, Gangguan tidak simetri akan menyebabkan mengalirnya arus tak seimbang dalam sistem. Gangguan hubung singkat ini dapat mengakibatkan arus yang sangat besar pada fasa yang mengalami gangguan dan juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak mengalami gangguan. Gangguan ini terdiri dari:

1. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan hubung singkat dua fasa menunjukkan gangguan hubung singkat yang terjadi antara kedua fasanya. Gangguan ini tidak mengandung komponen urutan nol karena tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah. Gambar rangkaian hubung singkat dua fasa dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa [3]

Besarnya arus hubung singkat dua fasa dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2 berikut:

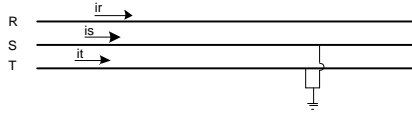
$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{x_1 + x_2} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2 \cdot x_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} x I_{sc\ 3\phi} \approx 0.866 \times I_{sc\ 3\phi} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

- $I_{sc\ 3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa
- $I_{sc\ 2\phi}$: arus hubung singkat 2 fasa
- V_{LN} : tegangan nominal *line to netral*
- V_{LL} : tegangan nominal *line to line*
- x_1 : reaktansi urutan positif
- x_2 : reaktansi urutan negatif

2. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah

Gangguan hubung singkat 2 fasa ketanah menunjukkan gangguan hubung singkat yang terjadi ketika kedua fasanya terhubung ke tanah. Gambar rangkaian hubung singkat dua fasa ketanah dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah [2]

Besarnya arus hubung singkat dua fasa ketanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 berikut:

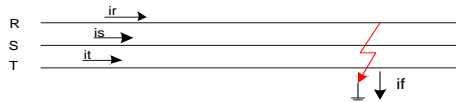
$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

- I_{A1} : arus hubung singkat 2 fasa ketanah
- V_f : teganganbus saat gangguan
- z_1 : impedansi urutan positif
- z_2 : impedansi urutan negatif
- z_3 : impedansi urutan nol

3. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah menunjukkan jenis gangguan asimetris, sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa arus gangguan saat terjadi gangguan. Gambar rangkaian hubung singkat satu fasa ketanah dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah [2]

Besarnya arus hubung singkat satu fasa ketanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 berikut:

$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3V_{LN}}{x_1 + x_2 + x_0} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

- $I_{sc\ 1\phi}$ = arus hubung singkat 1 fasa ketanah
- V_{LN} = tegangan nominal *line to netral*
- x_0 = reaktansi urutan nol

- x_1 = reaktansi urutan positif
 x_2 = reaktansi urutan negatif

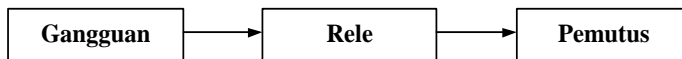
2.1.2 Gangguan Beban Lebih (*Over Load*)

Gangguan beban lebih menunjukkan gangguan yang terjadi akibat konsumsi daya listrik melebihi daya listrik yang dihasilkan pada pembangkit. Bila gangguan ini dibiarkan terus menerus berlangsung maka akan dapat merusak peralatan listrik yang dialiri arus tersebut.

2.2 Sistem Pengaman Tenaga Listrik [1]

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memperhatikan faktor keamanan dan keandalan penyaluran daya. Pada kenyataannya suatu sistem dapat terjadi kondisi gangguan atau hubung singkat yang dapat membahayakan sistem secara keseluruhan serta dapat menurunkan keandalan, sehingga diperlukan adanya sistem proteksi yang dapat meminimalisasi efek dari gangguan tersebut. Fungsi dari sistem proteksi adalah untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian jaringan yang terganggu dari bagian lain yang masih normal (tidak terganggu) sekaligus mengamankan bagian yang masih normal tersebut dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar, menghindari atau mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat adanya gangguan, dan menjaga keandalan dalam kontinuitas pelayanan tenaga listrik ke pelanggan. [1]

Rele adalah suatu peralatan pengaman pada sistem tenaga listrik yang bekerja dengan cara mendeteksi arus gangguan dan memerintahkan pemutus untuk bekerja agar memisahkan aliran daya antara area yang terkena gangguan dan area yang normal. Skema dari kerja rele pengaman ditampilkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema Konsep Kerja Rele [1]

Rele pengaman terdiri dari sebuah elemen operasi dan kontak. Elemen operasi akan menerima masukan dari trafo arus atau trafo tegangan. Keadaan keluaran rele adalah posisi kontak menutup dan ditahan. Rele akan memberikan sinyal kepada pemutus tenaga agar membuka dan mengisolasi sistem tenaga lain dari gangguan yang terjadi

jika keadaan keluaran kontak rele menutup [3]. Rele proteksi sebagai komponen utama sistem proteksi tenaga listrik dalam melaksanakan tugasnya yaitu untuk mengidentifikasi gangguan harus memenuhi persyaratan keandalan (*reliability*) sebagai berikut:

1. Kecepatan bereaksi
Semakin cepat waktu pemutusan arus gangguan maka dapat mengurangi dampak gangguan serta menjaga kestabilan sistem.
2. Sensitifitas
Kemampuan dari rele pengaman untuk merespon adanya gangguan di dalam daerah yang diproteksinya. Rele harus cukup peka dalam mengidentifikasi adanya gangguan minimum.
3. Selektifitas
Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik terjadinya gangguan serta melakukan pemutusan pada *breaker* secara tepat. Dalam hal ini rele hanya membuka pemutus tenaga yang diperlukan saja (tidak menyebabkan pemutusan atau pemadaman jaringan yang lebih luas).
4. Keandalan
Kemampuan sistem proteksi untuk menjamin peralatan proteksi akan bekerja jika terjadi suatu gangguan dan tidak akan bekerja jika tidak terjadi gangguan.
5. Ekonomis
Pertimbangan pemilihan peralatan yang harus atau tidak untuk dipasang sebagai peralatan pengaman perlu direncanakan agar tercapai sistem pengaman yang efektif dan ekonomis. [1]

2.2.1 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele arus lebih digunakan untuk mengamankan gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*). Rele arus lebih bekerja berdasarkan besarnya arus masukan dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur (Ipp) maka rele arus lebih tersebut akan bekerja.

Rele arus lebih ini beroperasi ketika terdapat arus yang mengalir pada rangkaian melebihi batas *setting* yang telah di ijinakan. Penggunaan rele arus lebih pada sistem kelistrikan industri harus disesuaikan berdasarkan koordinasi rele yang telah di *setting* dengan benar. Sehingga ketika pada sistem terjadi suatu gangguan rele ini bisa bekerja dengan cepat. Rele arus lebih akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut:

$I_f > I_{pp}$ rele bekerja (trip)
 $I_f < I_{pp}$ tidak bekerja (blok)

Setting rele arus lebih tidak boleh bekerja pada saat beban maksimum. Arus *setting* harus lebih besar dari arus beban maksimum. Pada tugas akhir ini menggunakan $1,05 - 1,4 I_{set}$. Jadi untuk *setting* dapat dilihat pada persamaan 2.5, 2.6, dan 2.7 sebagai berikut:

$$1,05 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 1,4 \times I_{FLA} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{nCT} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$I_{aktual} = I_{set} = Tap \times nCT \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana :

I_{FLA} = arus nominal *full load ampere*

Tap = arus *pick up setting* rele

I_{set} = arus *setting* aktual

nCT = rasio CT

Dicari nilai dibawahnya yang terdekat.

Pada penyetelan rele arus lebih juga harus memperhatikan batas maksimum *setting*, untuk alasan keamanan dan *back up* hingga ke sisi muara estimasi *setting* ditetapkan seperti pada persamaan 2.8:

$$I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ minimum}} \dots \dots \dots (2.8)$$

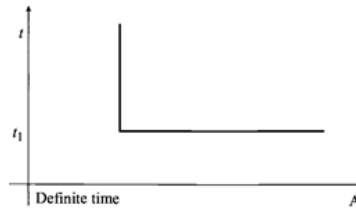
$I_{sc \text{ minimum}}$ adalah arus hubung singkat 2 fasa (*line to line*) dengan pembangkitan minimum yang terjadi diujung saluran seksi berikutnya. Besar arus ini diperoleh dari arus hubung singkat 3 fasa pada pembangkitan minimum dikalikan 0,866. Mengacu pada konsep diatas persyaratan setelan arus dapat dirumuskan seperti persamaan 2.9 sebagai berikut :

$$1,6 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ minimum}} \dots \dots \dots (2.9)$$

Untuk operasi yang selektif, apabila terdapat beberapa rele arus lebih pada suatu jaringan radial. Maka rele pada ujung yang terjauh dari sumber harus disetel untuk dapat bekerja pada waktu yang sesingkat mungkin. Untuk jenis rele arus yang lebih karakteristik *inverse*, *setting* waktunya ditentukan pada saat arus gangguan maksimum. Karakteristik waktu rele arus lebih dapat dibedakan dalam beberapa jenis antara lain:

2.2.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite*)

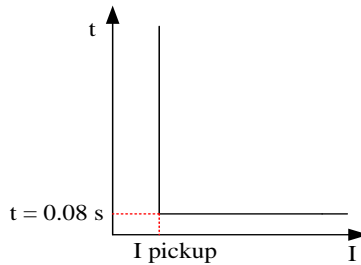
Pada penggunaan rele arus lebih waktu tertentu memungkinkan pengaturan waktu operasi yang bervariasi berdasarkan level arus yang berbeda. Sistem rele ini dapat disesuaikan sedemikian rupa sehingga PMT yang paling dekat dengan sumber gangguan akan bekerja (*trip*) lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman sisanya akan *trip* lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman lainnya akan *trip* setelah waktu tunda (*time delay*) yang diberikan ketika gangguan masih terus berlanjut. Pada rele arus lebih waktu tertentu, semua level arus yang melebihi *pick-up setpoint*-nya akan diputuskan dalam waktu yang sama (*definite*). Gambar 2.6 menunjukkan karakteristik rele arus lebih waktu tertentu.



Gambar 2.6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

2.2.1.2 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous*)

Rele ini bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai *setting*, rele akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik. Rele arus lebih seketika memiliki prinsip kerja rele tanpa penundaan waktu. Karakteristik rele arus lebih seketika memiliki waktu operasi 0,5cycle sampai 2 cycle atau antara 0,01-0,04 detik[4]. Rele ini jarang berdiri sendiri tetapi umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik yang lain. Gambar 2.7 menunjukkan karakteristik rele arus lebih waktu seketika.



Gambar 2.7 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

2.2.1.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse*) [4]

Rele arus lebih waktu terbalik memiliki batas *setting* yaitu rele tidak boleh bekerja saat beban maksimum, sehingga *setting* arus dari rele ini harus lebih besar dari arus beban penuh dari peralatan yang akan diamankan. Arus beban penuh suatu peralatan listrik tergantung dari besarnya kapasitas daya, tegangan, dan power faktor dari peralatan tersebut. Faktor pengali arus beban penuh ketika *setting* rele arus lebih yaitu $1,05 I_{FLA} < I_{set} < 1,4 I_{FLA}$.

Rele ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*), makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik operasi rele *inverse* bermacam-macam dan setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik waktunya dapat dibedakan dalam beberapa kelompok:

a. *Very Inverse*

Karakteristik *very inverse* memiliki kurva lebih curam dibanding kurva *inverse*. Karakteristik ini digunakan untuk koordinasi rele dengan perbedaan kapasitas arus gangguan di antara lokasi rele

b. *Normal Inverse*

Karakteristik ini digunakan sebagai karakteristik standart untuk koordinasi antar rele.

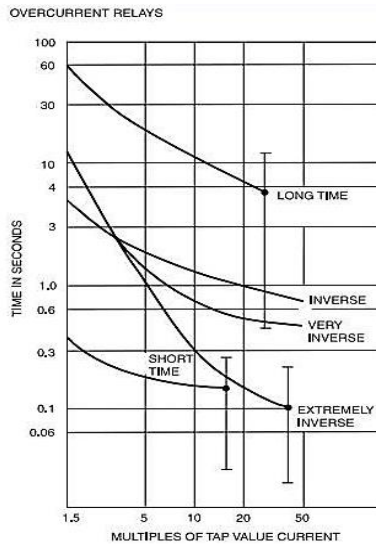
c. *Extremely Inverse*

Karakteristik ini lebih curam dibandingkan karakteristik *very inverse*, digunakan untuk koordinasi dengan fuse di sisi bawah rele.

d. *Long Time Inverse*

Karakteristik jenis *long time* memiliki waktu kerja yang cukup lama pada *setting* arus yang sama. Biasanya karakteristik ini digunakan untuk pengamanan tahanan pentanahan trafo dan cadangan pengamanan gangguan tanah.

Untuk kurva karakteristiknya bisa dilihat seperti dibawah ini :



Gambar 2.8 Karakteristik Operasi Rele Arus Lebih *Inverse* berdasarkan IEEE 242-2001 [4]

Berdasar Standart IEC karakteristik operasi rele seperti persamaan 2.10, 2.11, 2.12 dan 2.13 sebagai berikut:

1. *Very inverse*

$$t = \frac{13,5}{I - 1} \cdot T_d \dots \dots \dots (2.10)$$

2. *Standard inverse*

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} \cdot T_d \dots \dots \dots (2.11)$$

3. *Extremely inverse*

$$t = \frac{80}{(I^2 - 1)} \cdot T_d \dots\dots\dots (2.12)$$

4. *Long Time inverse*

$$t = \frac{120}{(I - 1)} \cdot T_d \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana :

$$I = \frac{I_f}{I_{set}} \dots\dots\dots (2.14)$$

I_f = arus hubung singkat maksimum

I_{set} = arus *setting* aktual rele

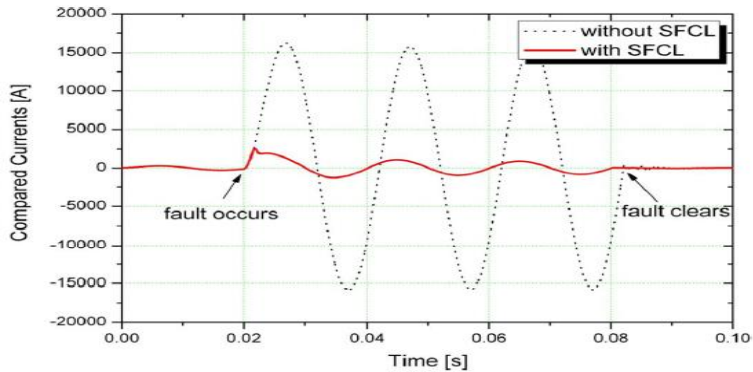
T_d = *time setting time dial*

t = *seting time delay* yang diinginkan

2.3 *Superconductor Fault Current Limiter (SFCL) [5]*

Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) menunjukkan suatu peralatan yang mampu membatasi arus gangguan yang muncul pada jaringan tenaga listrik. Seiring meningkatnya kapasitas pembangkit serta bertambahnya beban pada sistem tenaga listrik maka akan menyebabkan meningkatnya arus gangguan yang terjadi. Hal ini akan menyebabkan arus gangguan akan melebihi rating dari peralatan. Dengan menggunakan *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* maka arus gangguan yang terjadi akan dengan cepat dipotong dengan memanfaatkan impedansi dari *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*. *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* memiliki impedansi yang sangat rendah ketika dalam kondisi normal namun ketika dalam kondisi gangguan memiliki impedansi yang sangat tinggi

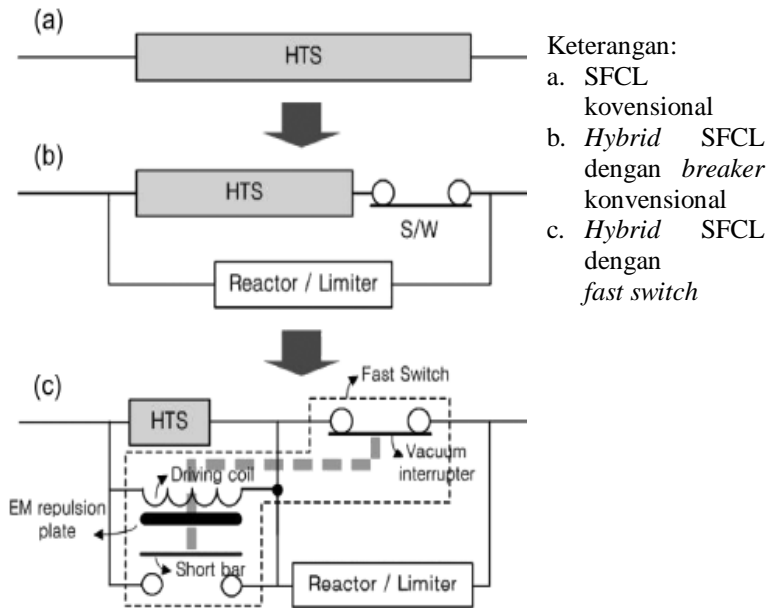
Sebuah *Superconductor Fault Current limiter (SFCL)* dapat membatasi arus hubung singkat dalam waktu kurang dari setengah *cycle*. Ada dua kategori SFCL yaitu SFCL dan *saturated iron core SFCL*. Gambar 2.9 menunjukkan grafik dari pemotongan arus pada SFCL.



Gambar 2.9 Gelombang Pereduksian Arus Oleh SFCL

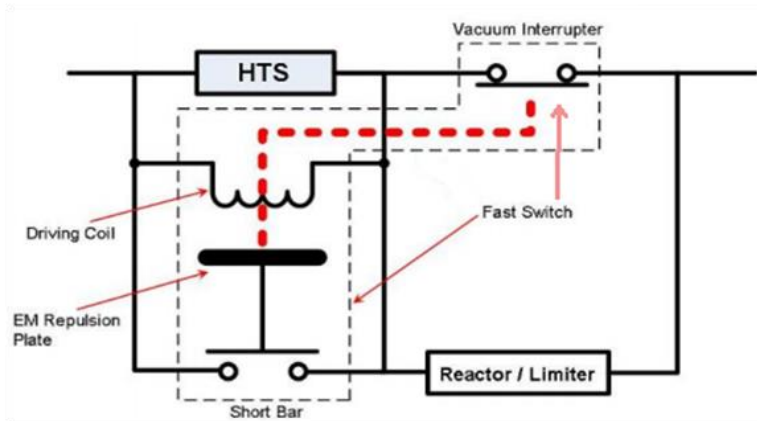
2.4 Hybrid SFCL [6]

Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) dilengkapi dengan High Temperature Superconductor (HTS). Komponen HTS (High Temperature Superconductor) menunjukkan komponen utama dari *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*. Komponen HTS terdiri dari *Superconductor* dan pendingin (*cryostat*). *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* mulanya hanya terdiri dari komponen HTS. Seiring dengan perkembangan teknologi, *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* berkembang menjadi *hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* dengan *breaker* konvensional serta *hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* dengan *fast switch*. Gambar 2.10 menunjukkan perubahan inovasi dari *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)*.



Gambar 2.10 Perubahan Inovasi dari *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) [6]

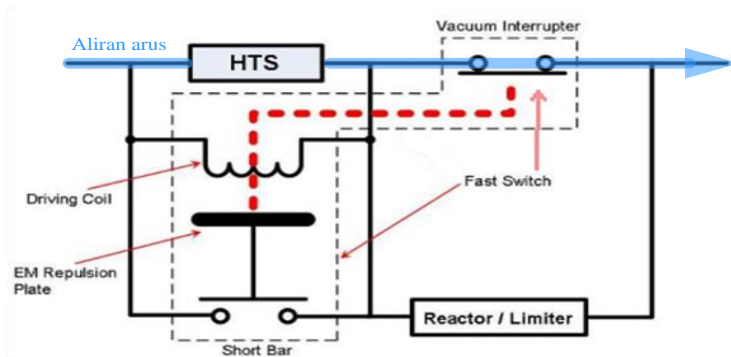
Pada Tugas Akhir ini digunakan *hybrid SFCL* untuk membatasi arus gangguan yang terjadi. *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) terdiri dari 3 bagian utama yaitu komponen HTS (*High Temperature Superconductor*) yang terdiri dari *superconductor* dan pendingin (*Cryostat*), *Fast switch* (*Vacuum Interrupter* dan *Short Bar*), dan reaktor atau *limiter*. Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian dari *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL).



Gambar 2.11 Rangkaian *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL)

2.4.1 Kondisi Operasi Normal

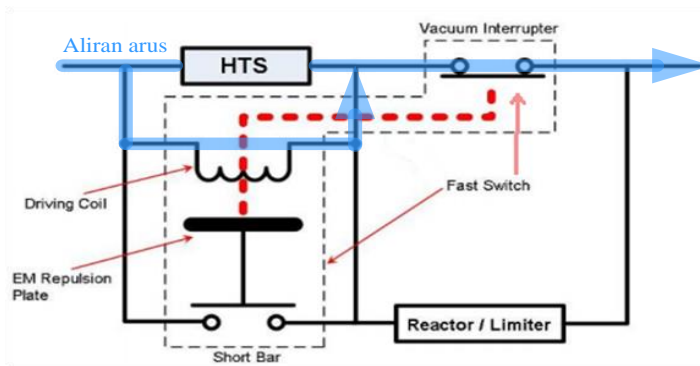
Pada saat kondisi normal arus akan mengalir melalui *superconductor* & *cryostat* yang terhubung seri dengan *Vacuum Interrupter*. Pada kondisi normal, temperatur operasi *superconductor* di jaga pada keadaan 77 Kelvin. Pada kondisi ini *superconductor* atau HTS menyerupai suatu penghantar tanpa hambatan atau memiliki impedansi sebesar 0 ohm. Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) pada kondisi operasi normal.



Gambar 2.12 *Hybrid SFCL* Kondisi Operasi Normal

2.4.2 Sensing Adanya Gangguan

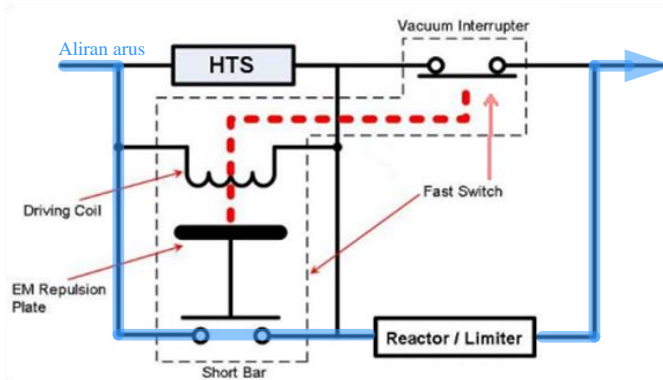
Ketika terjadi suatu gangguan, arus gangguan mengalir melalui *superconductor* sehingga *superconductor* akan menghasilkan panas yang selanjutnya akan meningkatkan nilai resistansi pada *superconductor*. Akibat meningkatnya resistansi pada *superconductor* maka selanjutnya arus gangguan akan mengaktifkan *coil*. Kuat medan magnet yang dihasilkan *coil* akan mendorong *fast switch 1 Vacuum Interrupter* dan *fast switch 2 Short Bar*. Gambar 2.13 menunjukkan rangkaian *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* pada kondisi *sensing* ketika terjadi arus gangguan.



Gambar 2.13 *Hybrid SFCL* Kondisi *Sensing* Ketika Terjadi Arus Gangguan

2.4.3 Kondisi Terjadinya Gangguan Setelah *Coil* Aktif

Setelah arus gangguan menngaktifkan coil maka selanjutnya *fast switch 1 Vacuum Interrupter* yang semula *normally close* menjadi *normally open* sedangkan *fast switch 2 Short Bar* yang semula *normally open* menjadi *normally close*. Akibatnya arus gangguan akan mengalir melalui *fast switch 2 Short Bar* dan akan melalui *reactor* atau *limiter*. Arus gangguan yang melalui *reactor* akan dibatasi sebelum $\frac{1}{2}$ cycle pertama. Gambar 2.14 menunjukkan rangkaian *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* pada kondisi terjadi gangguan setelah *coil* aktif.



Gambar 2.14 Hybrid SFCL Kondisi Terjadi Gangguan Setelah Coil Aktif

2.5 Pemasangan Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) [6]

Ada beberapa cara pemasangan *Superconducting Fault current limiter* (SFCL) untuk mengurangi arus gangguan. Pemasangan *Superconducting Fault current limiter* (SFCL) dapat diletakkan pada operasi *parallel* dengan 2 sistem dan *feeder* keluaran serta operasi pada sumber tenaga.

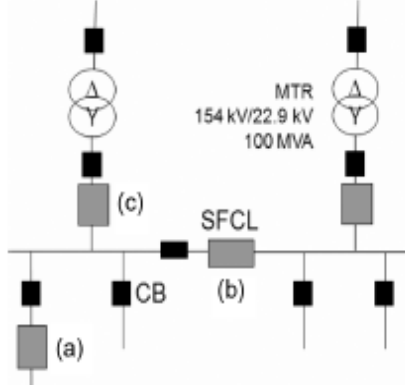
2.5.1 Operasi Paralel dengan 2 Sistem dan Feeder Keluaran

Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) dipasang pada interkoneksi antar sistem atau pada bagian dari bus. Dimana *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) dipasang pada busbar (*switchgear*) yang tidak mampu untuk menahan arus hubung singkat bila.

Ada beberapa keuntungan pada operasi ini bilamana di pasang *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) :

- Dapat mereduksi arus kontribusi hubung singkat yang menuju titik gangguan
- Peningkatan kehandalan pasokan listrik. Ketika terjadi gangguan tidak sampai menimbulkan pemadaman pada peralatan yang tidak terkena gangguan.
- Menghemat biaya penggantian *switchgear* baru. Dimana *switchgear* masih sesuai dengan kapasitas arus hubung singkat yang terjadi.

Jika terjadi arus hubung singkat pada *feeder* keluaran, *Hybrid Superconducting Fault current limiter* (SFCL) akan mereduksi arus gangguan yang menuju *switchgear*. Yang kemudian arus gangguan diamankan oleh *circuit breaker*. Pemasangan SFCL pada *feeder* keluaran dapat dilihat pada gambar 2.15.



Keterangan:
a. *feeder*
b. interkoneksi busbar
c. sumber tenaga listrik

Gambar 2.15 Pemasangan *Superconducting Fault Current Limiter* [6]

2.5.2 Perhitungan Desain *Current Limiting Reactor*

Besarnya nilai impedansi pada *Hybrid SFCL* dihitung berdasarkan persamaan arus hubung singkat 3 fasa dan impedansi pada reaktor :

$$I_{sc} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$Z = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc}} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$Z_{desire} = Z_{sfcl} + Z_{system} \dots \dots \dots (2.17)$$

Selanjutnya substitusi persamaan 2.16 ke 2.17 dengan tujuan mencari nilai Z_{SFCL} , sehingga didapatkan persamaan 2.18

$$Z_{sfcl} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{I_{sc_{desire}}} - \frac{1}{I_{sc_{system}}} \right] \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

V_{bus} = rating tegangan bus *Hybrid SFCL* dipasang (V)

$I_{SC\ desire}$ = nilai arus kontribusi *resetting* yang diinginkan yang lewat pada *Hybrid SFCL* (A)

$I_{SC\ system}$ = nilai arus kontribusi *existing* yang lewat di saluran yang akan dipasang *Hybrid SFCL* (A)

Z_{SFCL} = nilai impedansi CLR yang diinginkan (Ω)

Z_{desire} = nilai impedansi total (CLR + *existing*) (Ω)

Z_{system} = nilai impedansi *existing* (Ω)

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN

PT. AJINOMOTO INDONESIA

PT. Ajinomoto Indonesia adalah perusahaan yang memproduksi penyedap rasa dan berbagai bumbu masakan. Beberapa produk yang cukup dikenal antara lain Masako bumbu kaldu penyedap, Sajiku bumbu praktis siap saji, dan Saori bumbu masakan Asia dan Mayumi mayonaisse *yummy*. Pabrik pertamanya didirikan di Jalan Raya Mlirip, Jetis, Mojokerto Jawa Timur tahun 1969. Pada tugas akhir ini *study* dilakukan di pabrik pertama yaitu di Mojokerto.

3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Ajinomoto Indonesia

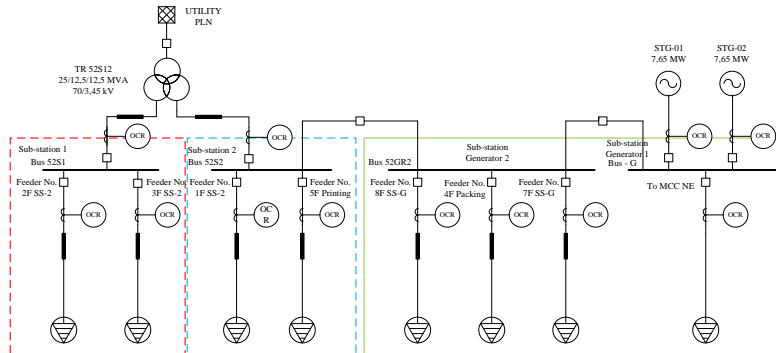
Sistem kelistrikan di PT. Ajinomoto Indonesia menggunakan sistem distribusi radial, dengan dua sumber listrik utama, yaitu suplai daya dari PLN dan dua buah pembangkit listrik tenaga uap. Pada awalnya hanya terdapat satu buah pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas 7,65 MW dan jaringan PLN. Namun seiring dengan perkembangan perusahaan, kini terdapat dua buah pembangkit listrik dengan kapasitas yang sama untuk menjaga keandalan serta kontinuitas pelayanan daya.

Di PT. Ajinomoto Indonesia terdapat 3 *sub-station*, yaitu *sub-station* 1 dengan beban sebesar 8409,5 kW, *sub-station* 2 dengan beban sebesar 3810,9 kW, dan *sub-station* generator dengan beban sebesar 7869,25 kW. PT. Ajinomoto Indonesia menggunakan level tegangan 3,45 kV dengan empat bus utama yaitu bus 52S1 sebagai *sub-station* 1, bus 52S2 sebagai *sub-station* 2, bus-G, dan bus 52GR2 sebagai *sub-station* generator. Untuk sumber yang berasal dari PLN, tegangan 70 kV di *konversi* menggunakan transformator *stepdown* tiga belitan menjadi tegangan 3,45 kV. Masing – masing daya dari belitan sekunder dan tersier trafo tersebut akan disalurkan menuju beban melalui bus 52S1 dan bus 52S2.

Sementara kedua generator mempunyai *rating* tegangan 3,45 kV sehingga tidak diperlukan trafo untuk mentransformasikan nilai tegangan terhadap sistem di bus utama. Sedangkan untuk tegangan rendahnya digunakan level tegangan 0,38 kV.

3.2 Single Line Diagram PT. Ajinomoto Indonesia

Adapun *single line diagram* sistem kelistrikan perusahaan ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia

3.3 Kapasitas Pembangkitan PT. Ajinomoto Indonesia

Suplai daya perusahaan ini terdiri dari *Utility* PLN dan dua buah *Steam Turbine Generator* (STG). Data kapasitas pembangkitan PT. Ajinomoto Indonesia dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Pembangkit Listrik di PT. Ajinomoto Indonesia

No	Nama Area	Nama Pembangkit Listrik	Kapasitas
1	Sub-Station Generator	STG-01	7,65 MW
2		STG-02	7,65 MW
3	Sub-Station 1 dan 2	PLN Utility	17 MW

3.4 Data Transformator PT. Ajinomoto Indonesia

Dengan sistem distribusi utama menggunakan level tegangan 3,45 kV, maka dalam operasi pendistribusian daya, diperlukan transformator untuk menurunkan tegangan 70 kV yang berasal dari *utility* PLN, demikian pula untuk melayani beban pada tegangan rendah 0,38 kV. Data transformator PT. Ajinomoto Indonesia meliputi rating tegangan dan kapasitas yang digunakan ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Transformator di PT. Ajinomoto Indonesia

No	ID Trafo	Lokasi	Tegangan (kV)
1	TR 52S12	Incoming PLN	72/3,45/3,45
2	U-TR 1	Sub-Station1 (Feeder No. 2F SS-2)	3,45 / 0,38
3	U-TR 2		3,45 / 0,38
4	TR-3F	Sub-Station1 (Feeder No. 3F SS-2)	3,45 / 0,38
5	T-1F A	Sub-Station2 (Feeder No. 1F SS-2)	3,45 / 0,38
6	T-1F B		3,45 / 0,38
7	TR-5F	Sub-Station2 (Feeder No. 5F PRINTING)	3,45 / 0,38
8	TR-7F A	Sub-Station Generator (Feeder No. 7F SS-G)	3,45 / 0,38
9	TR-7F B		3,45 / 0,38
10	TR-1	Sub-Station Generator	3,45 / 0,38
11	TR-8F	Sub-Station Genertor (Feeder No. 8F SS-G)	3,45 / 0,38
12	TR-4F	Sub-Station Generator (Feeder No. 4F PACKING)	3,45 / 0,38

3.5 Data Beban PT. Ajinomoto Indonesia

Di PT. Ajinomoto Indonesia terdapat dua macam beban, yaitu beban motor dan beban lump load. Total beban yang harus dilayani sebesar 20,089 MW yang terbagi ke dalam tiga *sub-station*. Masing – masing *sub-station* terbagi menjadi beberapa *feeder* dengan kapasitas pembebanan yang berbeda. Untuk data kapasitas pembebanan masing – masing *feeder* atau penyulang ditunjukkan pada Tabel 3.3. Sedangkan untuk pembebanan secara detail dari masing – masing *feeder* akan ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Data Pembebanan Masing – Masing *Feeder*

No	Feeder	Sub-Station	Pembebanan (kW)
1	No. 2F SS-2	Sub-Station1	5150
2	No. 3F SS-2		3369,5
3	No. 1F SS-2	Sub-Station2	3159
4	No. 5F PRINTING		651,9
5	BFP-1	Sub-Station Generator	250
6	TO MCC NE		262
7	No. 8F SS-G		2883
8	No. 7F SS-G		3992
9	No. 4F PACKING		482,25
Total Beban			20089,65

Tabel 3.4 Data Beban Motor dan *Lump Load* PT. Ajinomoto

No	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan	Rating Daya	Status
1	Drain Pool Pump 2	Sub-Station 1 (Feeder No. 2F SS-2)	3,3 kV	150 kW	<i>Continuous</i>
2	C/T 3 Pump B		3,3 kV	110 kW	<i>Continuous</i>
3	A/C-1 Mitsubishi		3,3 kV	1020 kW	<i>Continuous</i>
4	A/C-3 IHI		3,3 kV	1450 kW	<i>Continuous</i>
5	R. Water Pump 1		3,3 kV	150 kW	<i>Continuous</i>
6	C/T 1 Pump F		3,3 kV	150 kW	<i>Continuous</i>
7	C/W 15 Pump E		3,3 kV	110 kW	<i>Continuous</i>
8	UTILITY 1		0,38 kV	698 kVA	<i>Continuous</i>
9	EM. Department		0,38 kV	1055 kVA	<i>Continuous</i>
10	C/W 10 Pump D		3,3 kV	110 kW	<i>Continuous</i>
11	C/M 3		3,3 kV	410 kW	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 Data Beban Motor dan *Lump Load* PT. Ajinomoto (lanjutan)

No	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan	Rating Daya	Status
12	CENTAC (350) No. 2	<i>Sub-Station 1</i> (Feeder No. 3F SS-2)	3,3 kV	1500 kW	<i>Continuous</i>
13	ELLIOT A/C No. 4		3,3 kV	1250 HP	<i>Continuous</i>
14	Trane CM 5		3,3 kV	835 kW	<i>Spare</i>
15	C/T 1A		3,3 kV	162 kW	<i>Continuous</i>
16	C/T 1B		3,3 kV	150 kW	<i>Spare</i>
17	C/T 1C		3,3 kV	150 kW	<i>Spare</i>
18	C/T 2A		3,3 kV	160 kW	<i>Spare</i>
19	UTILITY 3		0,38 kV	486 kVA	<i>Continuous</i>
20	Chiller Machine 3		3,3 kV	362 kW	<i>Continuous</i>
21	Chiller Machine 6		3,3 kV	748 kW	<i>Spare</i>
22	Mits. Chiller 1		3,3 kV	950 kW	<i>Spare</i>
23	64M - A	<i>Sub-Station 2</i> (Feeder No. 1F SS-2)	3,3 kV	175 kW	<i>Continuous</i>
24	64M - B		3,3 kV	175 kW	<i>Continuous</i>
25	64M - C		3,3 kV	175 kW	<i>Continuous</i>
26	For Mentor 25-A		3,3 kV	250 kW	<i>Continuous</i>
27	H2NE		3,3 kV	245 kW	<i>Continuous</i>
28	Lux-T1F A		0,38 kV	765 kVA	<i>Continuous</i>
29	Lux-T1F B		0,38 kV	557 kVA	<i>Continuous</i>
30	C/T 3 Pump A		3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
31	C/T 3 Pump B		3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
32	FAN A		3,3 kV	110 kW	<i>Continuous</i>
33	FAN B		3,3 kV	110 kW	<i>Continuous</i>
34	C/T 3 Pump C		3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
35	Chill. Machine 5		3,3 kV	400 kW	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 Data Beban Motor dan *Lump Load* PT. Ajinomoto (lanjutan)

No	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan	Rating Daya	Status
36	Printing Machine 1	<i>Sub-Station 2 (Feeder No. 5F PRINTING - Load Center1)</i>	0,38 kV	35 kW	<i>Continuous</i>
37	Tanden Laminator		0,38 kV	200 kW	<i>Continuous</i>
38	Panel SDP & AC		0,38 kV	15 kW	<i>Continuous</i>
39	Printing Laminator Masako		0,38 kV	100 kW	<i>Spare</i>
40	Blower Comp Exh. Fan		0,38 kV	65 kW	<i>Continuous</i>
41	Machine Slitting 1	<i>Sub-Station 2 (Feeder No. 5F PRINTING - Load Center 2)</i>	0,38 kV	52 kW	<i>Continuous</i>
42	Laminator Tanden A		0,38 kV	52 kW	<i>Continuous</i>
43	Blower D		0,38 kV	15 kW	<i>Continuous</i>
44	Blower B3		0,38 kV	11 kW	<i>Spare</i>
45	MCC Fixed Type 1		0,38 kV	105 kW	<i>Continuous</i>
46	Blower A		0,38 kV	11 kW	<i>Continuous</i>
47	Blower C		0,38 kV	11 kW	<i>Continuous</i>
48	Lighting 1		0,38 kV	85 kVA	<i>Continuous</i>
49	Camin Lande B3		0,38 kV	57 kW	<i>Spare</i>
50	BM Pump		0,38 kV	4 kW	<i>Spare</i>
51	Colour Slitting Machine 1		0,38 kV	25 HP	<i>Continuous</i>
52	Chiller Machine 9	<i>Sub-Station Generator (Feeder No. 8F SS-G)</i>	3,3 kV	748 kW	<i>Continuous</i>
53	Chiller Machine 10		3,3 kV	748 kW	<i>Continuous</i>
54	Chiller Machine 11		3,3 kV	748 kW	<i>Continuous</i>
55	H5NE		3,3 kV	752kVA	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 Data Beban Motor dan *Lump Load* PT. Ajinomoto (lanjutan)

No	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan	Rating Daya	Status
56	DP 1	<i>Sub-Station Generator (Feeder No. 4F PACKING)</i>	0,38 kV	13 kW	<i>Continuous</i>
57	Boiler P3		0,38 kV	8,5 kW	<i>Continuous</i>
58	Cooling Tower 1		0,38 kV	20 kW	<i>Continuous</i>
59	SUPPLY Pump A		0,38 kV	75 kW	<i>Continuous</i>
60	SUPPLY Pump B		0,38 kV	76 kW	<i>Continuous</i>
61	CIRC Pump D		0,38 kV	130 kW	<i>Continuous</i>
62	CIRC Pump E		0,38 kV	130 kW	<i>Continuous</i>
63	Pack Machine 1		0,38 kV	15 kVA	<i>Continuous</i>
64	Pack Machine 2		0,38 kV	20 kVA	<i>Continuous</i>
65	CT2 - A	<i>Sub-Station Generator (Feeder No. 7F SS-G)</i>	3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
66	CT2 - B		3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
67	CT2 - C		3,3 kV	132 kW	<i>Continuous</i>
68	Chiller Machine 2		3,3 kV	748 kW	<i>Continuous</i>
69	CEMP		3,3 kV	850 kVA	<i>Continuous</i>
70	MASAKO		0,38 kV	1000kVA	<i>Continuous</i>
71	SAJIKU		0,38 kV	620 kVA	<i>Continuous</i>
72	Chiller Machine 1	<i>Sub-Station Generator</i>	3,3 kV	748 kW	<i>Continuous</i>
73	Boiler Pump Feed 1		3,6 kV	250 kW	<i>Continuous</i>
74	Boiler Pump Feed 2		3,6 kV	250 kW	<i>Spare</i>
75	TO MCC NE		0,38 kV	308 kVA	<i>Continuous</i>

3.6 Data Kabel PT. Ajinomoto Indonesia

Tabel 3.5 menunjukkan data kabel pada PT. Ajinomoto Indonesia.

Tabel 3.5 Data Kabel PT. Ajinomoto Indonesia

ID Kabel	Tegangan (kV)	Luas Penampang (cm ²)	Panjang (m)	R (Ohm)	X (Ohm)
1F SS-2 Cable	3,45	240	100,0	0,092000	0,097300
2F SS-2 Cable	3,45	240	130,0	0,092000	0,097300
3F SS-2 Cable1	3,45	240	100,0	0,092000	0,097300
4F Pack Cable	3,45	240	100,0	0,092000	0,097300
5F PRINT Cable	3,45	240	100,0	0,092000	0,097300
7F SS-2 Cable	3,45	240	100,0	0,092000	0,097300
8F SS-2 Cable	3,45	300	100,0	0,074200	0,095500
TR-PLN-Cable-SS1	3,45	400	200,0	0,056700	0,086000
TR-PLN-Cable-SS2	3,45	240	180,0	0,092000	0,097300

3.7 Data Rating Switchgear PT. Ajinomoto Indonesia

Tabel 3.6 merupakan data kemampuan bus utama dalam menahan arus hubung singkat yang terjadi. Nilai arus tersebut digunakan untuk menganalisa kemampuan *switchgear* menahan amplitudo maksimum atau *peak* arus hubung singkat.

Tabel 3.6 Data Rating Switchgear PT. Ajinomoto Indonesia

NO	ID BUS	Voltage (kV)	Existing	
			Sym Rms (kA)	Bracing Assym Peak (kA)
1	1F-B Bus3	3.45	40	100
2	2F-B Bus2	3.45	40	100
3	3F-B Bus4	3.45	40	100
4	7F-B Bus3	3.45	40	100
5	8F-B Bus2	3.45	40	100
6	Bus-G	3.45	40	100
7	Bus52GR2	3.45	40	100
8	Bus52S1	3.45	40	100
9	Bus52S2	3.45	40	100

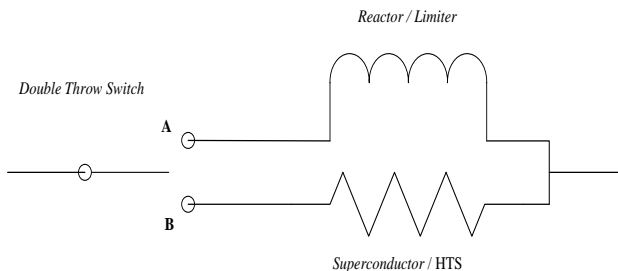
Tabel 3.6 menunjukkan nilai kapasitas simetri rms dan nilai kapasitas *assymmetry peak* arus hubung singkat pada masing-masing bus. Arus *bracing assymmetry peak* bernilai 2,5 kali nilai kapasitas simetri rms arus hubung singkat. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam menganalisa kondisi peralatan akibat arus hubung singkat yang terjadi pada masing – masing bus. Bila besarnya arus hubung singkat di sistem melebihi dari kapasitas *switchgear* maka perlu pengaman tambahan agar peralatan tidak rusak.

3.8 Permodelan *Hybrid SFCL*

Struktur *Hybrid SFCL* terdiri dari *reactor* atau *limiter*, *superconductor* dan *cryostat* atau *high temperature superconductor* (HTS), saklar cepat yang terdiri dari dua saklar mekanis atau *fast switch* (*vacuum interrupter* (VI) dan *short bar* (SB)), dan *driving coil*. Terdapat 3 kondisi operasi pada *Hybrid SFCL*. Pertama kondisi normal, kedua kondisi sensing karena adanya gangguan, ketiga kondisi ketika ada gangguan setelah coil aktif.

Pada kondisi pertama, *switch* berada pada posisi B. *Superconductor* atau HTS menyerupai suatu penghantar tanpa hambatan atau memiliki impedansi sebesar 0 ohm. Sehingga permodelan menggunakan impedansi yang nilai impedansinya bernilai mendekati 0 ohm. Pada kondisi ini *reactor* tidak aktif. Arus hanya mengalir melalui HTS dan ke beban. Pada kondisi kedua. Ketika terjadi gangguan hubung singkat nilai resistansi HTS menjadi lebih besar dan mengaktifkan *coil*. Aktifnya *coil* membuat saklar *fast switch* yang sebelumnya berada pada posisi B menjadi ke posisi A. Pada kondisi ketiga, posisi saklar sudah berada di posisi A. maka arus gangguan akan mengalir ke *reactor* dan direduksi oleh *reactor*.

Pada tugas akhir ini permodelan *Hybrid SFCL* menggunakan *impedance* sebagai HTS, *reactor* sebagai CLR, *double throw switch* sebagai saklar *fast switch*. Untuk lebih jelasnya ditunjukkan oleh gambar 3.7.



Gambar 3.7 Permodelan *Hybrid SFCL*

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA DI PT. AJINOMOTO INDONESIA

4.1 Analisa Hubung Singkat dan Kemampuan Peralatan

Bus dalam sistem tenaga listrik digunakan sebagai media untuk mengalirkan listrik ke *feeder* jaringan. Salah satu jenis *bus* yaitu *switchgear*. Pada Tugas Akhir ini dibahas mengenai aplikasi penggunaan dari *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (Hybrid SFCL)* sebagai sistem pengamanan peralatan seperti *switchgear* di PT Ajinomoto Indonesia. Analisa hubung singkat dilakukan pada masing-masing busbar atau *switchgear*. Untuk analisis kemampuan peralatan, dilakukan analisis hubung singkat maksimum 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle untuk melihat kondisi bus ketika terjadi gangguan maksimum atau dalam fase sub-transien (*momentary*) dalam standart ANSI pada saat kondisi awal atau *existing*. Gangguan hubung singkat diberikan pada *bus* utama dengan *rating* tegangan 3.45 kV dan dilihat berapa nilai arus *asymmetry peak* (nilai arus puncak yang mengandung komponen DC). Dengan melakukan analisa hubung singkat tiga fasa $\frac{1}{2}$ cycle selanjutnya dapat diketahui busbar mana saja yang arus hubung singkatnya melebihi rating dari kemampuan *bracing* busbar atau dalam keadaan kritis. Setelah mengetahui *switchgear* mana saja yang dalam keadaan kritis maupun tidak mampu menahan arus hubung singkat tiga fasa $\frac{1}{2}$ cycle, maka selanjutnya diletakkan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* untuk melindungi busbar tersebut. Penggunaan SFCL ini digunakan untuk mereduksi arus hubung singkat yang menuju busbar yang masuk kategori arus hubung singkatnya melebihi rating dari kemampuan *bracing* busbar atau dalam keadaan kritis. Tabel 4.1 menunjukkan data analisis gangguan maksimum 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle dan kemampuan peralatan.

Tabel 4.1 Data perbandingan kemampuan *Bus* 3.45 kV Dengan I_{sc} maksimum 3 fasa pada kondisi $\frac{1}{2}$ cycle

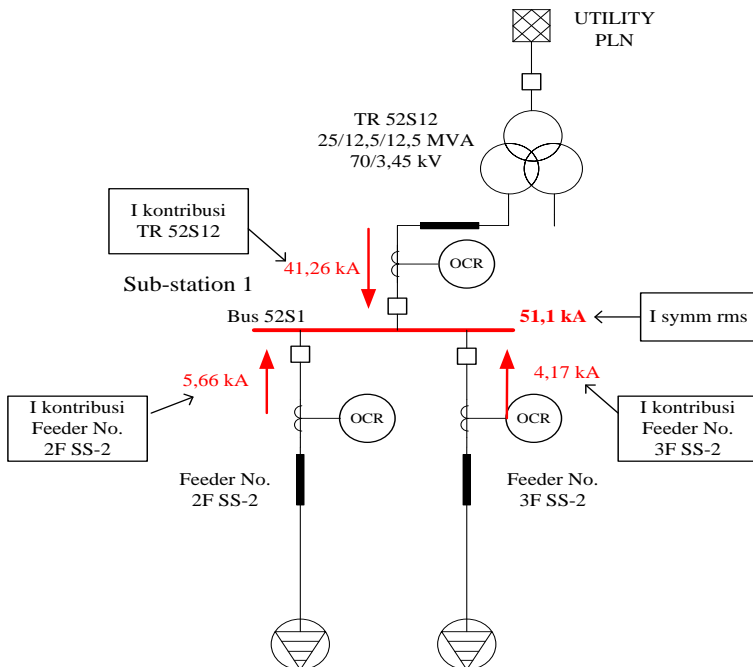
No	ID Bus	Rating Bus (kV)	Bracing Peak Bus (kA)	Asymmetri peak Arus Gangguan 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle (kA)
1	Bus 52S1	3,45	100	122,999
2	Bus 52S2	3,45	100	163,737
3	Bus 52GR2	3,45	100	163,737
4	Bus-G	3,45	100	163,737

Dari data tabel 4.1 dapat dianalisa bahwa nilai puncak dari arus gangguan maksimal 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada ke empat bus melebihi nilai batas kemampuan peralatan atau *bracing peak bus* yaitu sebesar 100 kA. Untuk itu sistem ini membutuhkan sebuah *device* pembatas arus hubung singkat yaitu *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter (Hybrid SFCL)*. Untuk pemilihan penempatan *Hybrid SFCL* maka perlu menganalisa arus kontribusi hubung singkat pada tiap – tiap bus agar dapat mengetahui arus kontribusi dari bus atau *feeder* mana yang membuat nilai arus hubung singkat pada bus tersebut menjadi bernilai tinggi.

Kontribusi arus hubung singkat pada bus 52S1 berasal dari Trafo TR. 52S12, kontribusi *Feeder* No. 2F SS-2, dan kontribusi *Feeder* No. 3F SS-2 . Ketika dilakukan hubung singkat tiga fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada bus 52S1 terlihat Trafo TR. 52S12 menyumbang arus kontribusi sebesar 41,26 kA, *Feeder* No. 2F SS-2 menyumbang arus kontribusi sebesar 5,66 kA, *Feeder* No. 3F SS-2 menyumbang arus kontribusi sebesar 4,17 kA. Data arus hubung singkat tiga fasa pembangkitan maksimum pada bus 52S1 ditunjukkan pada tabel 4.2. Gambar 4.1 menunjukkan arah dan nilai arus kontribusi hubung singkat pada bus 52S1 ketika pembangkitan maksimum.

Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus 52S1

ID	I kont Trafo (kA)	I Kont Feeder No. 2F- SS 2 (kA)	I Kont Feeder No. 3F- SS 2 (kA)	I Simetri Rms (kA)	I Asimetri Rms (kA)	I Asimetri Peak (kA)
BUS 52S1	41,26	5,66	4,17	51,1	72,014	122,999



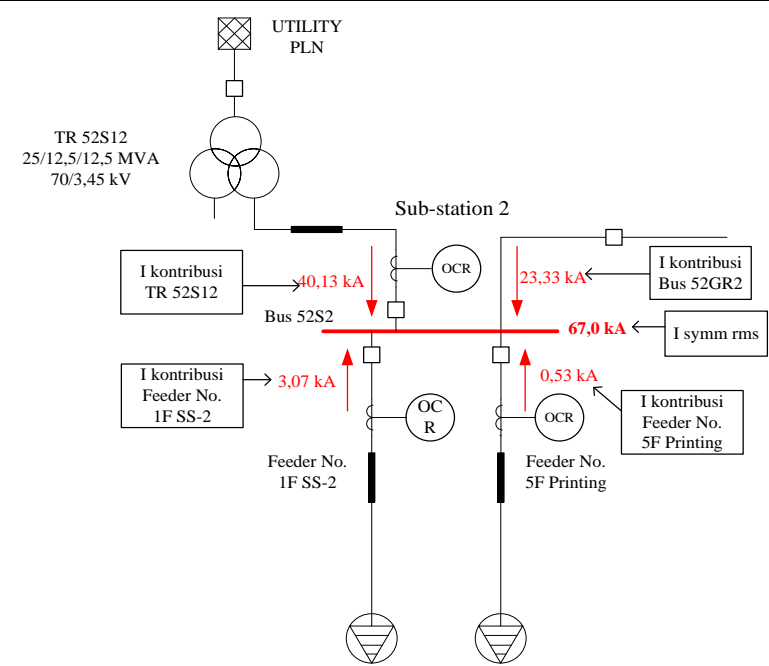
Gambar 4.1 Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52S1

Kontribusi arus hubung singkat pada bus 52S2 berasal dari Trafo TR. 52S12, kontribusi *Feeder* No. 1F SS-2, dan kontribusi *Feeder* No. 5F *Printing*. Ketika dilakukan hubung singkat tiga fasa ½ cycle pada bus 52S2 terlihat Trafo TR. 52S12 menyumbang arus kontribusi sebesar 40,13 kA, *Feeder* No. 1F SS-2 menyumbang arus kontribusi sebesar 3,07 kA, *Feeder* No. 5F *Printing* menyumbang arus kontribusi sebesar 0,53 kA, dan Bus 52GR2 menyumbang arus kontribusi sebesar 23,33

kA. Data arus hubung singkat tiga fasa pembangkitan maksimum pada bus 52S2 ditunjukkan pada tabel 4.3. Gambar 4.2 menunjukkan arah dan nilai arus kontribusi hubung singkat pada bus 52S2 ketika pembangkitan maksimum.

Tabel 4.3 Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus 52S2

ID	I kont Trafo (kA)	I Kont Feeder No. 1F-SS 2 (kA)	I Kont Feeder No. 5F Printing (kA)	I Kont Bus 52GR2 (kA)	I Simetri Rms (kA)	I Asimetri Rms (kA)	I Asimetri Peak (kA)
BUS 52S2	40,13	3,07	0,53	23,33	67,0	96,171	163,737



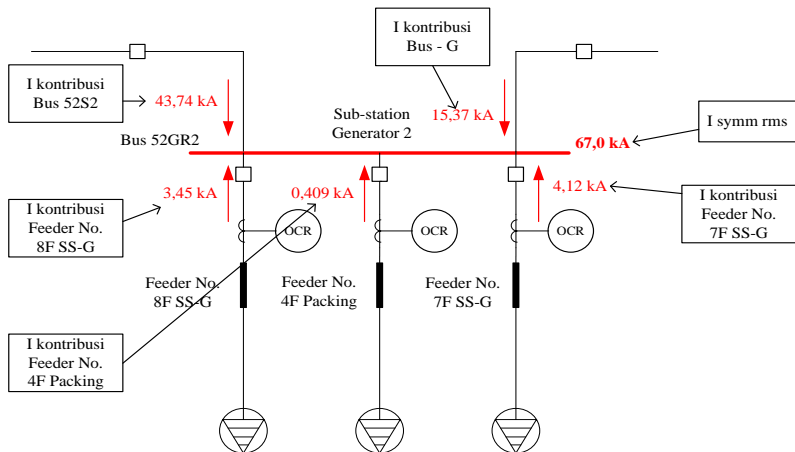
Gambar 4.2 Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52S2

Kontribusi arus hubung singkat pada bus 52GR2 berasal dari bus 52S2, kontribusi *Feeder* No. 8F SS-G, kontribusi *Feeder* No. 4F *Packing*, kontribusi *Feeder* No. 7F SS-G dan kontribusi Bus – G. Ketika

dilakukan hubung singkat tiga fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada bus 52GR2 terlihat bus 52S2 menyumbang arus kontribusi sebesar 43,74 kA, Feeder No. 8F SS-G menyumbang arus kontribusi sebesar 3,45 kA, Feeder No. 4F Packing menyumbang arus kontribusi sebesar 0,409 kA, Feeder No. 7F SS-G menyumbang arus kontribusi sebesar 4,12 kA, Bus – G menyumbang arus kontribusi sebesar 15,37 kA. Data arus hubung singkat tiga fasa pembangkitan maksimum pada bus 52GR2 ditunjukkan pada tabel 4.4. Gambar 4.3 menunjukkan arah dan nilai arus kontribusi hubung singkat pada bus 52GR2 ketika pembangkitan maksimum.

Tabel 4.4 Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa $\frac{1}{2}$ cycle Bus 52GR2

ID	I kont Bus 52S2 (kA)	I Kont Feeder No. 8F SS-G (kA)	I Kont Feeder No. 4F Packing (kA)	I Kont Feeder No. 7F SS-G (kA)	I Kont Bus - G (kA)	I Simetr i Rms (kA)	I Asimetr i Rms (kA)	I Asimetr i Peak (kA)
BUS 52GR2	43,74	3,45	0,409	4,12	15,37	67,0	96,171	163,737



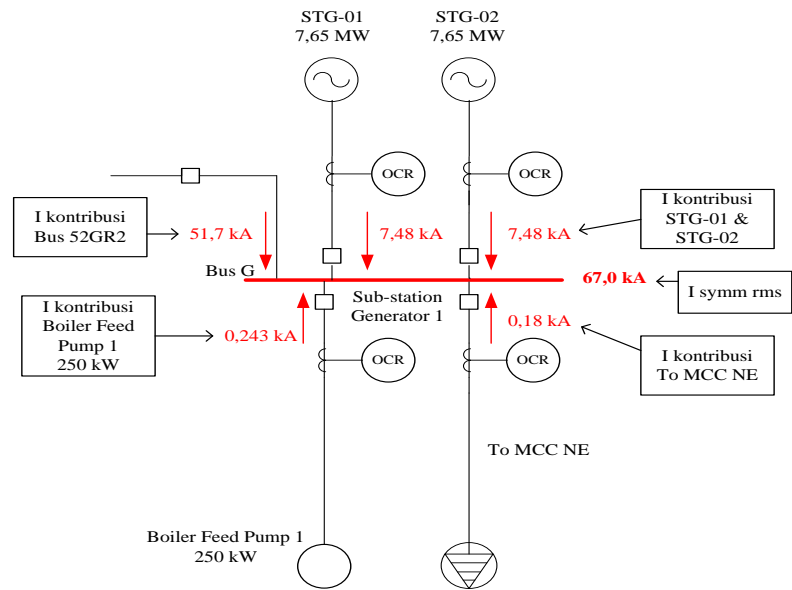
Gambar 4.3 Nilai Arus Kontribusi Pada Bus 52GR2

Kontribusi arus hubung singkat pada bus – G berasal dari bus 52GR2, kontribusi *Boiler Feed Pump 1*, kontribusi *To MCC NE*, kontribusi STG-01 dan STG-02. Ketika dilakukan hubung singkat tiga fasa $\frac{1}{2}$ cycle pada bus – G terlihat bus 52GR2 menyumbang arus

kontribusi sebesar 51,7kA, *Boiler Feed Pump 1* menyumbang arus kontribusi sebesar 0,243 kA, *To MCC NE* menyumbang arus kontribusi sebesar 0,18kA, generator STG-01 dan STG-02, masing – masing menyumbang arus kontribusi sebesar 7,48kA. Data arus hubung singkat tiga fasa pembangkitan maksimum pada bus – G ditunjukkan pada tabel 4.5. Gambar 4.4 menunjukkan arah dan nilai arus kontribusi hubung singkat pada bus – G ketika pembangkitan maksimum.

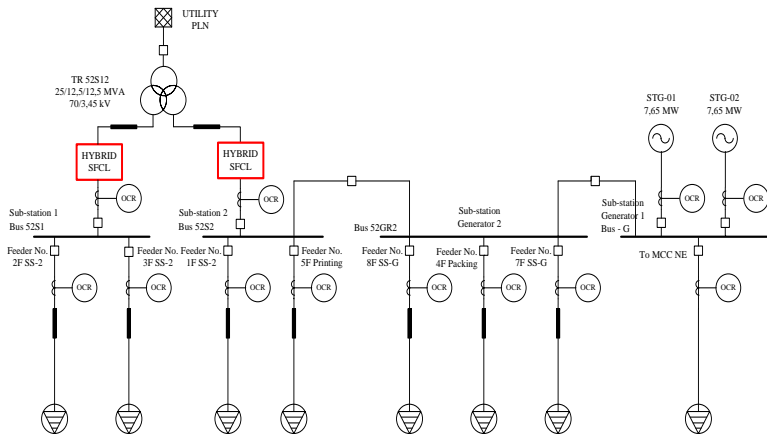
Tabel 4.5 Data Arus Hubung Singkat Tiga Fasa ½ cycle Bus–G

ID	I kont Bus 52GR2 (kA)	I Kont Boiler Feed Pump (kA)	I Kont To MCC NE (kA)	I Kont STG-02 (kA)	I Kont STG-02 (kA)	I Simetri Rms (kA)	I Asimetri Rms (kA)	I Asimetri Peak (kA)
BUS Bus-G	51,7	0,243	0,18	7,48	7,48	67,0	96,171	163,737



Gambar 4.4 Nilai Arus Kontribusi Pada Bus – G

Dari data hubung singkat pada beberapa busbar di atas dapat di analisa bahwa arus kontribusi hubung singkat terbesar dalam sistem kelistrikan PT. Ajinomoto Indonesia adalah berasal dari trafo TR.52S12 yaitu sebesar 41,26 kA pada bus 52S1 dan 40,13 kA pada bus 52S2. Berdasarkan hasil analisa tersebut maka *Hybrid SFCL* akan di pasang pada sekunder dan tersier trafo TR. 52S12. Lebih detilnya ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Lokasi pemasangan *Hybrid SFCL*

4.2 Perhitungan nilai reaktansi *Current Limiter Reactor*

Pada Tugas Akhir ini CLR terhubung secara parallel dengan *superconductor*. Arus hubung singkat direduksi dengan memanfaatkan nilai reaktansi pada CLR. Besarnya tegangan sistem 3,45 kV, arus hubung singkat pada bus 52S1 sebesar 51100 A dan arus hubung singkat kontribusi trafo TR. 52S12 sebesar 41260 A. Arus hubung singkat pada bus 52S1 diinginkan sebesar 36000 A. Maka arus hubung singkat kontribusi trafo TR. 52S12 harus sebesar 41260 A – (51100 A – 36000 A) = 26160 A. Maka perhitungan nilai reaktansi CLR pada SFCL 1 (persamaan 2.18).

$$Z_1 = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{I_{sc_{desire}}} - \frac{1}{I_{sc_{system}}} \right]$$

$$Z_1 = \frac{3450}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{26160} - \frac{1}{41260} \right]$$

$$Z_1 = 0,0278 \Omega$$

Dipilih $Z_1 = 0,028 \Omega$

Koreksi :

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_desire}} - \frac{V_s}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_system}} \\ 0,028 &= \left[\frac{3450}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_desire}} \right] - \left[\frac{3450}{\sqrt{3}} \frac{1}{41260} \right] \\ 0,028 &= \left[1991,85 \frac{1}{I_{sc_desire}} \right] - [0,048] \\ 1991,85 \frac{1}{I_{sc_desire}} &= 0,028 + 0,048 \\ I_{sc_desire} &= \frac{1}{(0,076/1991,85)} \\ I_{sc_desire} &= 26208 \text{ A} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan koreksi nilai arus kontribusi sebesar 26208 A dan masih mendekati desain.

Selanjutnya, untuk SFCL 2, besarnya tegangan sistem 3,45 kV, arus hubung singkat pada bus 52S2 sebesar 67000 A dan arus hubung singkat kontribusi trafo TR. 52S12 sebesar 40130 A. Arus hubung singkat pada bus 52S2 diinginkan sebesar 36000 A. Maka arus hubung singkat kontribusi trafo TR. 52S12 harus sebesar 40130 A – (67000 A – 36000 A) = 9130 A. Maka perhitungan nilai reaktansi CLR pada SFCL 2 (persamaan 2.18).

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{I_{sc_desire}} - \frac{1}{I_{sc_system}} \right] \\ Z_2 &= \frac{3450}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{9130} - \frac{1}{40130} \right] \\ Z_2 &= 0,1685 \Omega \end{aligned}$$

Dipilih $Z_2 = 0,2 \Omega$

Koreksi :

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_desire}} - \frac{V_s}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_system}} \\ 0,2 &= \left[\frac{3450}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{sc_desire}} \right] - \left[\frac{3450}{\sqrt{3}} \frac{1}{40130} \right] \\ 0,2 &= \left[1991,85 \frac{1}{I_{sc_desire}} \right] - [0,049] \end{aligned}$$

$$1991,85 \frac{1}{I_{sc_{desired}}} = 0,2 + 0,049$$

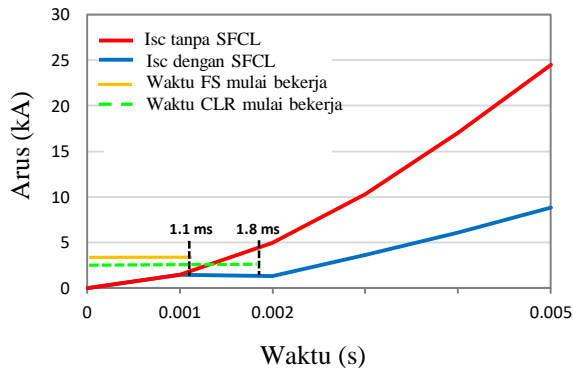
$$I_{sc_{desired}} = \frac{1}{(0,249/1991,85)}$$

$$I_{sc_{desired}} = 8000 \text{ A}$$

Hasil perhitungan koreksi nilai arus kontribusi sebesar 8000 A dan masih mendekati desain.

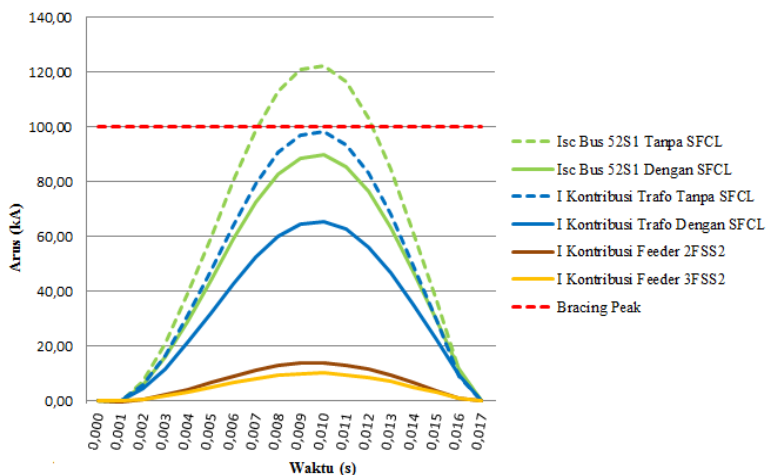
4.3 Cara Kerja SFCL

Pada gambar 4.6 arus hubung singkat sebelum pemasangan Hybrid SFCL terlihat pada gelombang berwarna merah, sedangkan grafik hubung singkat setelah dipasang *Hybrid* SFCL terlihat pada gelombang berwarna biru. Total waktu berpindahnya arus hubung singkat ke parallel *superconductor* adalah sebesar 1 ms. HTS mendeteksi gangguan pada saat 1,1 ms setelah terjadi arus hubung singkat. *Drive coil* mulai mendeteksi arus gangguan dan *fast switch* mulai bekerja pada 1,1 ms dan berakhir pada 1,8 ms. Kemudian arus yang mengalir ke HTS menjadi nol dan total arus gangguan mengalir ke jalur paralel menuju CLR untuk di reduksi memanfaatkan reaktansinya. Grafik proses kerja SFCL ditunjukkan pada gambar 4.6.



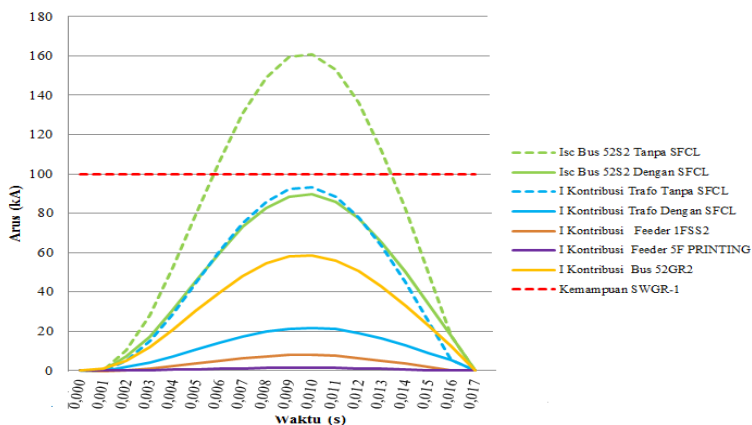
Gambar 4.6 Gelombang *Hybrid* SFCL

Untuk menurunkan arus hubung singkat agar peralatan aman dari arus hubung singkat yang melebihi kapasitas rating peralatan, maka pemasangan Hybrid SFCL merupakan cara yang tepat sehingga arus puncak hubung singkat dapat di reduksi. Bentuk gelombang $\frac{1}{2}$ cycle pertama arus hubung singkat pada bus 52S1 dan bus 52S2 ditunjukkan pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.



Gambar 4.7 Grafik Arus Hubung Singkat Bus 52S1

Dari gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai puncak arus hubung singkat melebihi *bracing switchgear* jika tanpa adanya pembatasan arus hubung singkat. Sedangkan nilai arus hubung singkat total pada bus 52S1 diperoleh dari penjumlahan seluruh arus kontribusi pada bus 52S1. Yaitu I kontribusi trafo, I kontribusi *Feeder* 2FSS2, dan I kontribusi *Feeder* 3FSS2.



Gambar 4.8 Grafik Arus Hubung Singkat Bus 52S2

Dari gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai puncak arus hubung singkat melebihi *bracing switchgear* jika tanpa adanya pembatasan arus hubung singkat. Sedangkan nilai arus hubung singkat total pada bus 52S2 diperoleh dari penjumlahan seluruh arus kontribusi pada bus 52S2. Yaitu I kontribusi Trafo, I kontribusi *Feeder* 5F Printing, I kontribusi *Feeder* 1FSS2, dan I kontribusi Bus 52GR2.

Data perbandingan arus hubung singkat $\frac{1}{2}$ Cycle pada sistem sebelum dan setelah pemasangan *Hybrid* SFCL ditunjukkan pada tabel 4.6, tabel 4.7, tabel 4.8, dan tabel 4.9. Tabel 4.10 merupakan data arus hubung singkat 3 fasa untuk perhitungan rele. Tabel 4.11 merupakan data arus hubung singkat *line to line* 30 cycle untuk perhitungan rele.

Tabel 4.6 Data Arus Hubung Singkat $\frac{1}{2}$ Cycle Asimetri Rms Kontribusi Trafo Sebelum dan Sesudah Pemasangan *Hybrid* SFCL

No	ID Bus	Rating Bus (kV)	Bracing Bus Symmetry Rms (kA)	Arus Gangguan Asimetri Rms 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle (kA)	
				Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
1	Bus 52S1	3,45	40	41,260	25,100
2	Bus 52S2	3,45	40	40,130	7,999

Tabel 4.7 Data Arus Hubung Singkat $\frac{1}{2}$ Cycle Symetri Rms Sebelum dan Sesudah Pemasangan Hybrid SFCL

No	ID Bus	Rating Bus (kV)	Bracing Bus Symmetry Rms (kA)	Arus Gangguan Simetri Rms 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle (kA)	
				Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
1	Bus 52S1	3,45	40	51,075	34,981
2	Bus 52S2	3,45	40	66,984	34,909
3	Bus 52GR2	3,45	40	66,984	34,909
4	Bus – G	3,45	40	66,984	34,909

Tabel 4.8 Data Arus Hubung Singkat $\frac{1}{2}$ Cycle Asimetri Rms Sebelum dan Sesudah Pemasangan Hybrid SFCL

No	ID Bus	Rating Bus (kV)	Bracing Bus Asymmetry Rms (kA)	Arus Gangguan Asimetri Rms 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle (kA)	
				Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
1	Bus 52S1	3,45	59	72,014	51,584
2	Bus 52S2	3,45	59	96,171	53,730
3	Bus 52GR2	3,45	59	96,171	53,730
4	Bus – G	3,45	59	96,171	53,730

Tabel 4.9 Data Arus Hubung Singkat $\frac{1}{2}$ Cycle Asimetri Peak Sebelum dan Sesudah Pemasangan Hybrid SFCL

No	ID Bus	Rating Bus (kV)	Bracing Bus Asymmetry Peak (kA)	Arus Gangguan Asimetri Peak 3 fasa $\frac{1}{2}$ cycle (kA)	
				Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
1	Bus 52S1	3,45	100	122,999	87,382
2	Bus 52S2	3,45	100	163,737	90,212
3	Bus 52GR2	3,45	100	163,737	90,212
4	Bus - G	3,45	100	163,737	90,212

Tabel 4.10 Data Arus Hubung Singkat 3 Fasa 4 Cycle Pada Rele

No	ID Rele	Gangguan di bus	Arus Kontribusi (A)
1	51F225A	2F-B2 Bus3	29240
2	51F225	2F-B Bus2	29240
3	51F22	Bus 52S1	30870
4	51S1	Kont Trafo	25150
5	T-1F B LUX	T-1F B Bus3	28020
6	H4 FEEDER	1F-B Bus3	28020
7	T-1F A LUX	1F-B1 Bus3	28020
8	H1H2 FEEDER	1F-B Bus3	28020
9	51F21	Bus 52S2	29300
10	51S2	Kont Trafo	7970
11	52F278	7F-B1 Bus3	28130
12	52F271	7F-B Bus3	28130
13	52F27	Bus G	29300
14	52G1	Kont STG-01	7480

Tabel 4.11 Data Arus Hubung Singkat *Line to Line 30 Cycle* Pada Rele

No	ID Rele	Gangguan di bus	Arus Kontribusi (A)
1	51F225A	2F-B2 Bus3	20500
2	51F225	2F-B Bus2	20500
3	51F22	Bus 52S1	21670
4	51S1	Kont Trafo	21670
5	T-1F B LUX	T-1F B Bus3	17140
6	H4 FEEDER	1F-B Bus3	17140
7	T-1F A LUX	1F-B1 Bus3	17140
8	H1H2 FEEDER	1F-B Bus3	17140
9	51F21	Bus 52S2	17740
10	51S2	Kont Trafo	7000
11	52F278	7F-B1 Bus3	17140
12	52F271	7F-B Bus3	17140
13	52F27	Bus G	17740
14	52G1	Kont STG-01	5480

4.4 Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

Koordinasi proteksi rele arus lebih adalah *setting* rele arus lebih untuk mengatur arus dan waktu yang bertujuan untuk mengatur arus sensing rele dan mengatur waktu operasi antar rele agar bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Rele akan bekerja dengan memberikan sinyal kepada *circuit breaker* agar dapat mengisolasi gangguan sehingga dapat menjaga kontinuitas penyaluran daya dan menjaga peralatan dari kerusakan. Koordinasi rele arus lebih dilakukan karena pemasangan *Hybrid SFCL* berpengaruh pada nilai arus gangguan hubung singkat seperti data di tabel 4.6 sampai tabel 4.9. Pada studi koordinasi rele akan dianalisis *setting* rele sebelum pemasangan *Hybrid SFCL* atau disebut kondisi *existing* dan sesudah pemasangan *Hybrid SFCL* atau disebut kondisi *resetting*.

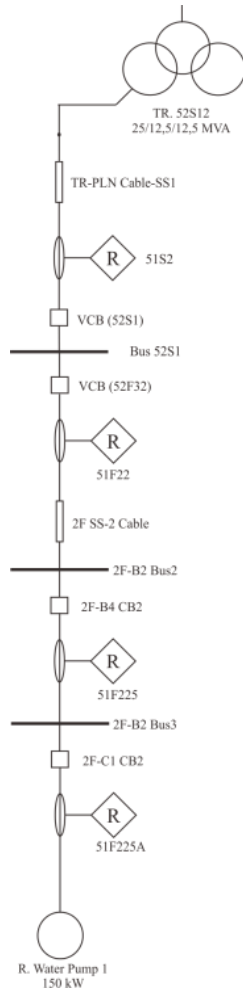
Hal pertama yang dilakukan adalah menganalisa kondisi *existing* rele di PT. Ajinomoto Indonesia dengan menggunakan kurva TCC (*Time Current Curve*). Jika rele tidak terkoordinasi dengan baik, maka perlu dilakukan *setting* ulang atau *resetting* pada rele tersebut. Kedua melakukan *setting* ulang atau *resetting* yang meliputi perhitungan untuk menentukan nilai *lowset*, *time dial*, *highset* dan *time delay* dari rele arus lebih. Setelah menemukan parameter nilai untuk rele kondisi *resetting*,

4.4.1 Pemilihan Tipikal Koordinasi pada PT. Ajinomoto Indonesia

4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1

Rele 51S1 melindungi sisi sekunder trafo TR 52S12 dan bus 52S1. Rele 51F22 melindungi bus 52S1, bus 2F-B Bus 2, dan sebagai *back up* rele sebelumnya. Rele 51F25 melindungi bus 2F-B2 Bus 3,

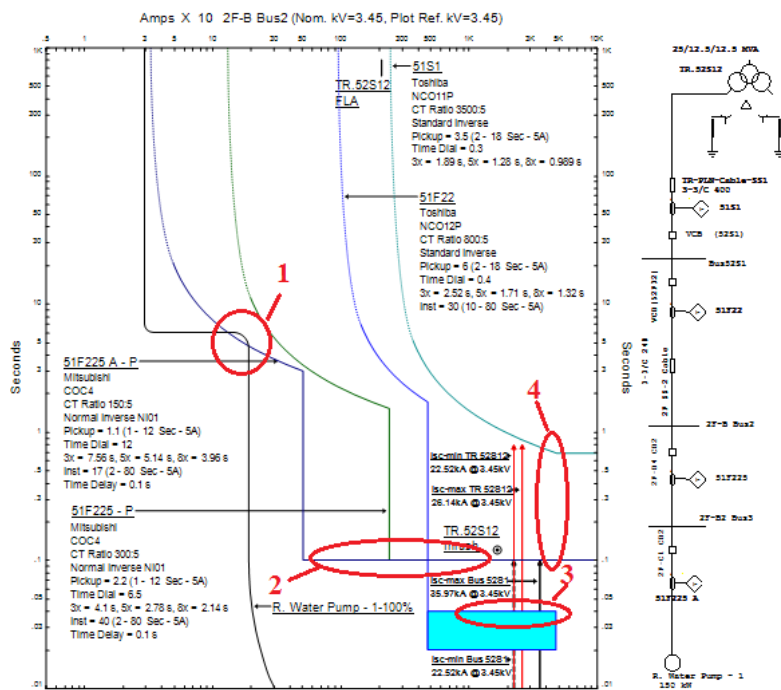
bus 2F-B Bus 2, dan sebagai *back up* rele sebelumnya. Rele 51F225A melindungi R Water Pump 1. *Single Line Diagram* untuk tipikal 1 dapat dilihat pada Gambar 4.10. Data *existing* rele tipikal 1 dapat dilihat pada tabel 4.12. Sedangkan plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 1 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.10 *Single Line Diagram* Koordinasi Rele Tipikal 1

Tabel 4.12 Data *Existing* Rele Tipikal 1

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
51F225A	150/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,1
		<i>Time Dial</i>	12
		<i>Pickup Highset</i>	17
		<i>Time Delay</i>	0,1
51F225	300/5	<i>Pickup Lowset</i>	2,2
		<i>Time Dial</i>	6,5
		<i>Pickup Highset</i>	40
		<i>Time Delay</i>	0,1
51F22	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	6
		<i>Time Dial</i>	0,4
		<i>Pickup Highset</i>	30
		<i>Time Delay</i>	-
51S1	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,3
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-



Gambar 4.11 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 1

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 1, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva invers rele 51F225A masih menyentuh kurva *starting* motor, sehingga motor tidak akan bisa *start*.
2. Pada lingkaran nomor 2, rele 51F225 dan rele 51F225A memiliki waktu *delay* yang sama yaitu sebesar 0,1 detik, sehingga ketika terjadi gangguan, kedua rele akan bekerja bersamaan.
3. Pada lingkaran nomor 3, rele 51F22 juga memotong kurva rele yang ada dibawahnya, sehingga rele 51F22 akan bekerja terlebih dahulu pada 0,04 detik.
4. Pada lingkaran nomor 4, time delay antar rele tidak sesuai standar yaitu tidak diantara 0,2 – 0,4 detik. Selain itu *setting*

time delay antar rele juga kurang tepat, sehingga ketika terjadi hubung singkat urutan rele yang aktif adalah rele 51F22 karena *setting instantaneous* 0,04 detik, rele 51F225 dan rele 51F225A aktif bersamaan karena *setting time delay* 0,1 detik, dan rele 51S1 aktif paling terakhir dengan waktu *delay* melebihi standar.

Akibat adanya penambahan Hybrid SFCL dan berdasarkan hasil analisa koordinasi rele pada kondisi *existing* tipikal 1 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengamanan. Berikut perhitungannya :

☑ Rele 51F225A

Manufaktur	: MITSUBISHI
Model	: COC4 – A01D1
Kurva	: NI01 (Normal Inverse)
Rasio CT	: 150/5
Isc min Bus 2F-B2 Bus3	: 20,5 kA
Isc max Bus 2F-B2 Bus3	: 29,24 kA
FLA Motor	: 30,85 A
LRC Motor	: 200,5 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA Motor} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Motor}$$

$$1,05 \cdot 30,85 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 30,85$$

$$32,3925 < I_{\text{set}} < 43,19$$

$$\frac{32,3925}{\frac{n_{CT}}{150/5}} < \text{Tap} < \frac{43,19}{\frac{n_{CT}}{150/5}}$$

$$\frac{32,3925}{150/5} < \text{Tap} < \frac{43,19}{150/5}$$

$$1,079 < \text{Tap} < 1,439$$

Dipilih Tap 1,1 (*Range* 1 – 12 dengan *step* 0,1)

$$I_{\text{set}} = 1,1 \times 150/5 = 33 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]^{\frac{0,14}{-1}} \times \frac{T_d}{10}$$

Dipilih waktu operasi (t) = waktu *starting* motor = 7 detik

$$t = \left[\frac{1,3 \cdot I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right]^{0,02} - 1 \times \frac{T_d}{10}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot t \cdot \left[\left(\frac{1,3 \cdot I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot 7 \cdot \left[\left(\frac{1,3 \cdot 200,5}{33} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 21,1$$

Dipilih $T_d = 22$

Instantaneous Pickup

$$LRC < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot I_{\text{sc min Bus 2F-B2 Bus3}}$$

$$200,5 < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot 20500$$

$$200,5 < I_{\text{set}} < 16400$$

$$\frac{200,5}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{16400}{n_{CT}}$$

$$\frac{200,5}{150/5} < \text{Tap} < \frac{164000}{150/5}$$

$$6,6833 < \text{Tap} < 546,67$$

Dipilih Tap 8 (*Range 2 – 80 dengan step 1*)

$$I_{\text{set}} = 8 \times 150/5 = 240 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

☑ Rele 51F225

Manufaktur	: MITSUBISHI
Model	: COC4 – A01D1
Kurva	: NI01 (Normal Inverse)
Rasio CT	: 300/5
Isc min Bus 2F-B Bus2	: 20,5 kA
Isc max Bus 2F-B Bus2	: 29,24 kA
FLA Bus 2F-B2 Bus 3	: 107,1 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA Bus 2F-B2 Bus 3} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Bus 2F-B2 Bus 3}$$

$$1,05 \cdot 107,1 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 107,1$$

$$112,455 < I_{\text{set}} < 149,94$$

$$\frac{112,455}{\frac{n_{CT}}{300/5}} < \text{Tap} < \frac{149,94}{\frac{n_{CT}}{300/5}}$$

$$1,8742 < \text{Tap} < 2,499$$

Dipilih Tap 2 (*Range* 1 – 12 dengan *step* 0,1)
 $I_{set} = 2 \times 300/5 = 120 \text{ A}$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 2F-B Bus2}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 2F-B Bus2}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot 0,3 \cdot \left[\left(\frac{29240}{120} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 2,44$$

Dipilih $T_d = 9$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \cdot \text{FLA Bus 2F-B2 Bus 3} < I_{set} < 0,8 \cdot \text{Isc min Bus 2F-B Bus2}$$

$$1,6 \cdot 107,1 < I_{set} < 0,8 \cdot 20500$$

$$171,36 < I_{set} < 16400$$

$$\frac{171,36}{\frac{n_{CT}}{300/5}} < \text{Tap} < \frac{16400}{\frac{n_{CT}}{300/5}}$$

$$\frac{171,36}{300/5} < \text{Tap} < \frac{16400}{300/5}$$

$$2,856 < \text{Tap} < 273,333$$

Dipilih Tap 20 (*Range* 2 – 80 dengan *step* 1)
 $I_{set} = 20 \times 300/5 = 1200 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

☑ **Rele 51F22**

Manufaktur : TOSHIBA
 Model : NCO12P – 02AK52
 Kurva : Standard Inverse
 Rasio CT : 800/5
 Isc min Bus 52S1 : 21,67 kA
 Isc max Bus 52S1 : 30,87 kA
 FLA Bus 2F-B Bus2 : 1035 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA Bus 2F-B Bus2} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Bus 2F-B Bus2}$

$1,05 \cdot 1035 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 1035$

$1086,75 < I_{\text{set}} < 1449$

$$\frac{1086,75}{\frac{n_{CT}}{800/5}} < \text{Tap} < \frac{1449}{\frac{n_{CT}}{800/5}}$$

$$\frac{1086,75}{800/5} < \text{Tap} < \frac{1449}{800/5}$$

$6,79 < \text{Tap} < 9,056$

Dipilih Tap 7 (*Range 2 – 18 A*)

$I_{\text{set}} = 7 \times 800/5 = 1120 \text{ A}$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 52S1}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 52S1}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,5 \cdot \left[\left(\frac{30870}{1120} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,24$

Dipilih $T_d = 0,25$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

☑ **Rele 51S1**

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO11P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 3500/5
Isc min Kontribusi Sekunder TR. 52S12	: 21,67 kA
Isc max Kontribusi Sekunder TR. 52S12	: 25,15 kA
FLA Sekunder TR. 52S12	: 2092 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA Sekunder TR. 52S12} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Sekunder TR. 52S12}$

$1,05 \cdot 2092 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 2092$

$2196,6 < I_{\text{set}} < 2928,8$

$$\frac{2196,6}{\frac{n_{CT}}{3500/5}} < \text{Tap} < \frac{2928,8}{\frac{n_{CT}}{3500/5}}$$

$$\frac{2196,6}{3500/5} < \text{Tap} < \frac{2928,8}{3500/5}$$

$3,138 < \text{Tap} < 4,184$

Dipilih Tap 3,5 (*Range 2 – 18 A*)

$I_{\text{set}} = 3,5 \times 3500/5 = 2450 \text{ A}$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{\text{Isc max Kontribusi Sekunder TR. 52S12}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{\text{Isc max Kontribusi Sekunder TR. 52S12}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \cdot \left[\left(\frac{25150}{2450} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,24$

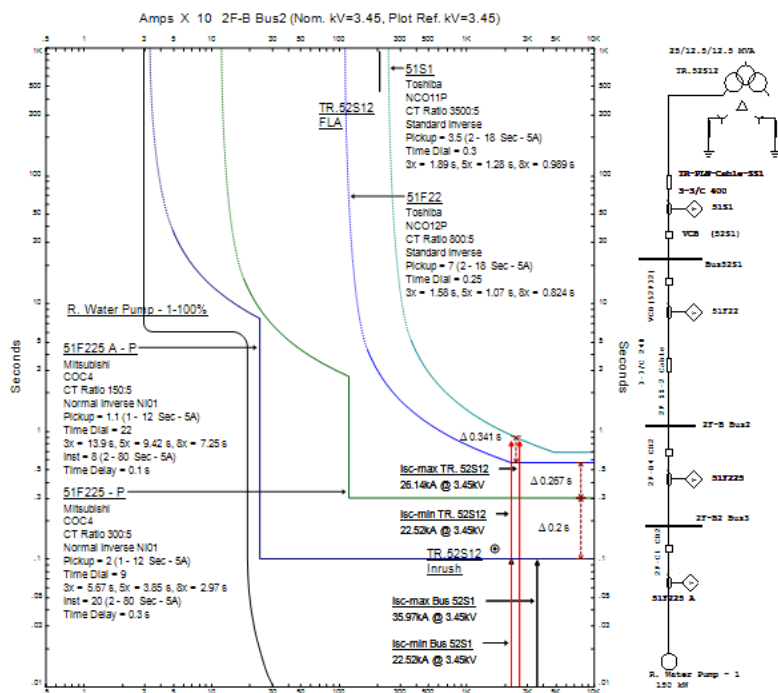
Dipilih $T_d = 0,3$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

Dengan hasil perhitungan diatas, maka selanjutnya dilakukan *plotting* kurva arus dan waktu atau TCC pada *Star-Protective Device Coordination*. Data *resetting* rele dan hasil plot kurva TCC tipikal 1 ditunjukkan pada tabel 4.13 dan gambar 4.12.

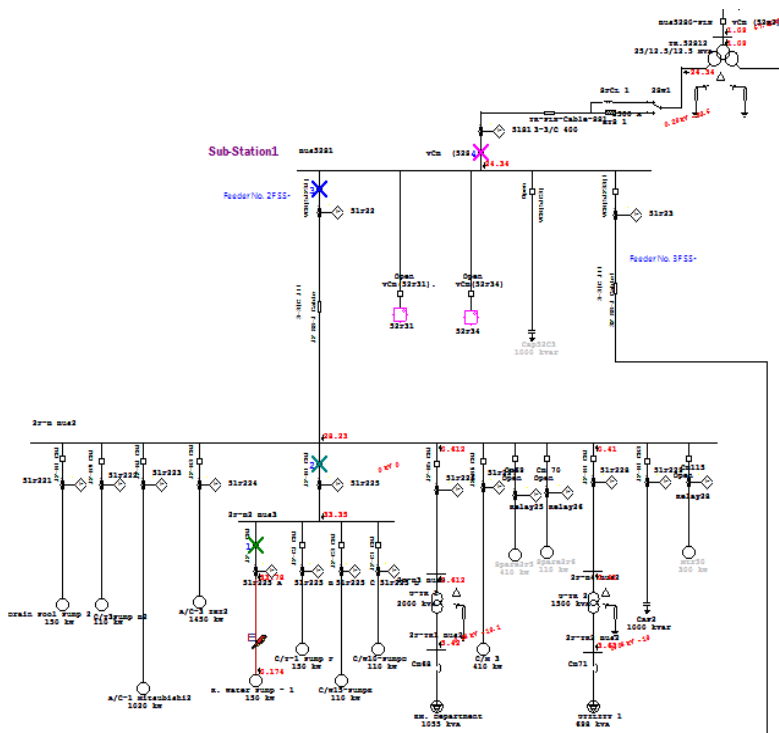
Tabel 4.13 Data *Resetting* Rele Tipikal 1

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
51F225A	150/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,1
		<i>Time Dial</i>	22
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,1
51F225	300/5	<i>Pickup Lowset</i>	2
		<i>Time Dial</i>	9
		<i>Pickup Highset</i>	20
		<i>Time Delay</i>	0,3
51F22	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	7
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51S1	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,3
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-



Gambar 4.12 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 1

Setelah melakukan *plot* kurva setting rele pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi hasil *resetting* rele. Pada evaluasi ini yang diperhatikan yaitu urutan dan waktu kerja dari rele pengaman. Gambar 4.13 menunjukkan urutan kerja rele ketika terjadi gangguan dan gambar 4.14 menunjukkan waktu kerja atau *Sequence Of Operation Event* (*Sequence Viewer*) dari evaluasi yang dilakukan pada Tipikal 1.



Gambar 4.13 Data Urutan Kerja Rele Hasil *Resetting* Tipikal 1

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between R. Water Pump - 1 & CT48. Adjacent bus: 2F-B2 Bus3

Data Rev.: Base Config: SFCL Date: 12-10-2016

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	51F225 A	33.776	100		Phase - OC1 - 50
200	2F-C1 CB2		100		Tripped by 51F225 A Phase - OC1 - 50
300	51F225	33.348	300		Phase - OC1 - 50
400	2F-B4 CB2		100		Tripped by 51F225 Phase - OC1 - 50
567	51F22	28.228	567		Phase - OC1 - 51
667	VCB(52F32)		100		Tripped by 51F22 Phase - OC1 - 51
894	51S1	24.342	894		Phase - OC1 - 51
994	VCB (52S1)		100		Tripped by 51S1 Phase - OC1 - 51

Gambar 4.14 Sequence Viewer Tipikal 1

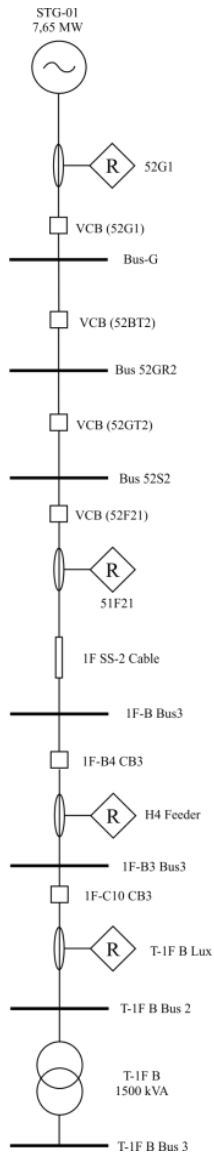
Dari gambar 4.13 menunjukkan urutan kerja rele sudah sesuai dengan desain dan gambar 4.14 merupakan hasil laporan *Sequence Viewer* dari tipikal 1 yang dilakukan dengan cara memberi gangguan hubung singkat 3 fasa pada motor R.Water Pump. Dari hasil laporan *Sequence Viewer*, dapat dilihat bahwa *setting* rele sudah tepat karena ketika terjadi hubung singkat maka rele 51F225A bekerja di waktu 0,1 detik, rele 51F225 bekerja di waktu 0,3 detik, rele 51F22 bekerja di waktu 0,567 detik, dan rele 51S1 bekerja di 0,894 detik. *Grading time* antar rele sudah sesuai yaitu sebesar 0,2 – 0,4 detik.

4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2

Tipikal 2 ini merupakan koordinasi sistem pengaman dari generator STG-01 dengan kapasitas daya 7,65 MW sampai dengan trafo T-1F B dengan rating daya 1500 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele 52G1, rele 51F21, rele H4 *Feeder*, dan rele T-1F B Lux.

Rele 52G1 melindungi generator STG-01. Rele 51F21 melindungi bus 1F-B Bus 3, bus 52S2 dan *back up* rele sebelumnya. Rele H4 *Feeder* melindungi bus 1F-B3 Bus 3, bus 1F-B Bus 3 dan *back up* rele sebelumnya. Rele T-1F B Lux melindungi trafo T-1F B.

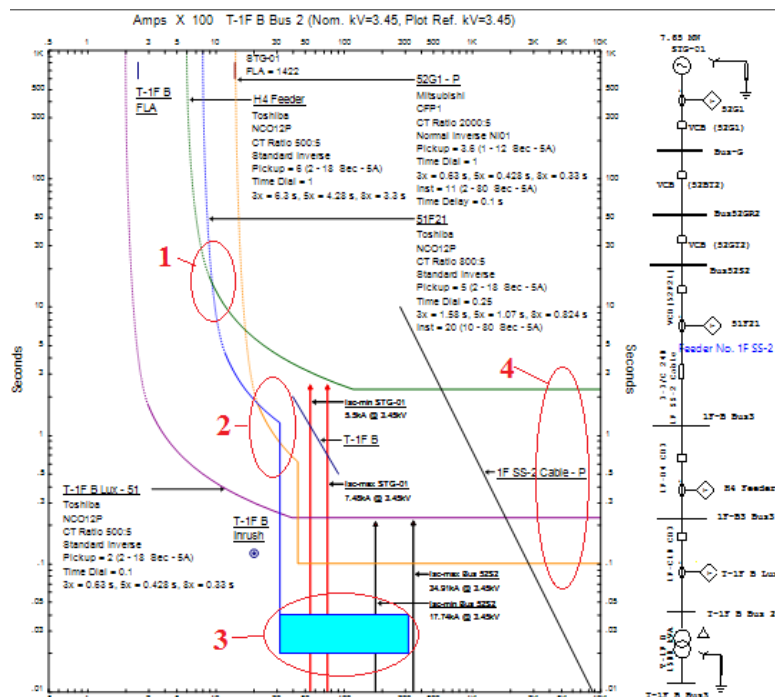
Single Line Diagram untuk tipikal 2 dapat dilihat pada gambar 4.15. Data *existing* rele tipikal 2 dapat dilihat pada tabel 4.14. Sedangkan plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 2 dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.15 *Single Line Diagram* Koordinasi Rele Tipikal 2

Tabel 4.14 Data *Existing* Rele Tipikal 2

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
T-1F B Lux	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	2
		<i>Time Dial</i>	0,1
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
H4 Feeder	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	6
		<i>Time Dial</i>	1
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	20
		<i>Time Delay</i>	-
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,6
		<i>Time Dial</i>	1
		<i>Pickup Highset</i>	11
		<i>Time Delay</i>	0,1



Gambar 4.16 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 2

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 2, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva rele H4 *Feeder* berpotongan dengan rele 51F21 sehingga rele tidak bisa bekerja secara selektif dalam melokalisir gangguan, karena rele 51F21 akan aktif lebih dulu.
2. Pada lingkaran nomor 2, kurva rele 52G1 berpotongan dengan rele 51F21 sehingga rele tidak bisa bekerja secara selektif dalam melokalisir gangguan, karena rele 51F21 akan aktif lebih dulu.
3. Pada lingkaran nomor 3, *setting instantaneous* rele 51F21 dapat mengakibatkan rele 51F21 aktif pada 0,04 detik.
4. Pada lingkaran nomor 4, time delay antar rele tidak sesuai standar yaitutidak diantara 0,2 – 0,4 detik. Selain itu *setting*

time delay antar rele juga kurang tepat, sehingga ketika terjadi hubung singkat urutan rele yang aktif adalah rele 51F21 karena *setting instantaneous* 0,04 detik, rele 52G1 karena *settingtime delaynya* 0,1 detik, rele T-1F B Lux, dan rele H4 Feeder aktif paling terakhir dengan waktu *delay* melebihi standar.

Akibat adanya penambahan Hybrid SFCI dan berdasarkan hasil analisa koordinasi rele pada kondisi *existing* tipikal 2 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengamanan. Berikut perhitungannya :

☒ **Rele T-1F B Lux**

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO12P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 500/5
FLA Primer Trafo T-1F B	: 251 A
Isc min Bus 1F-B3 Bus3	: 17,14 kA (3,45 kV)
Isc max Bus 1F-B3 Bus3	: 28,02 kA (3,45 kV)
Isc max Bus T-1F B Bus3	: 33,1 kA (0,38 kV)
Konversi ke sisi primer	: $(0,38/3,45) \times 33,1 = 3,65$ kA

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA Primer TR. T-1F B} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Primer TR. T-1F B}$

$1,05 \cdot 251 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 251$

$263,55 < I_{\text{set}} < 351,4$

$\frac{263,55}{\frac{n_{CT}}{500/5}} < \text{Tap} < \frac{351,4}{\frac{n_{CT}}{500/5}}$

$\frac{263,55}{500/5} < \text{Tap} < \frac{351,4}{500/5}$

$2,635 < \text{Tap} < 3,514$

Dipilih Tap 3 (*Range* 2 – 18 A)

$I_{\text{set}} = 3 \times 500/5 = 300$ A

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 1F-B3 Bus3}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 1F-B3 Bus3}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \cdot \left[\left(\frac{28020}{300} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,07$$

Dipilih $T_d = 0,05$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

☑ Rele H4 Feeder

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO12P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 500/5
Isc min Bus 1F-B Bus3	: 17,14 kA
Isc max Bus 1F-B Bus3	: 28,02 kA
FLA H4 Feeder	: 405,06 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA H4 Feeder} < I_{set} < 1,4 \cdot \text{FLA H4 Feeder}$$

$$1,05 \cdot 405,06 < I_{set} < 1,4 \cdot 405,06$$

$$425,88 < I_{set} < 567,84$$

$$\frac{425,88}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{567,84}{n_{CT}}$$

$$\frac{425,88}{500/5} < \text{Tap} < \frac{567,84}{500/5}$$

$$4,258 < \text{Tap} < 5,678$$

Dipilih Tap 4,5 (*Range 2 – 18 A*)

$$I_{set} = 4,5 \times 500/5 = 450 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus 1F-B Bus3}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \max \text{ Bus 1F-B Bus3}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \cdot \left[\left(\frac{28020}{450} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,18$

Dipilih $T_d = 0,15$

Instantaneous Pickup : Disable / Lock

☒ **Rele 51F21**

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO12P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 800/5
Isc min Bus 52S2	: 17,74 kA
Isc max Bus 52S2	: 29,3 kA
FLA Bus 1F-B Bus3	: 632 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA Bus 1F-B Bus3} < I_{set} < 1,4 \cdot \text{FLA Bus 1F-B Bus3}$

$1,05 \cdot 632 < I_{set} < 1,4 \cdot 632$

$663,6 < I_{set} < 884,8$

$\frac{663,6}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{884,8}{n_{CT}}$

$\frac{663,6}{800/5} < \text{Tap} < \frac{884,8}{800/5}$

$4,1475 < \text{Tap} < 5,53$

Dipilih Tap 5 (Range 2 – 18 A)

$I_{set} = 5 \times 800/5 = 800 \text{ A}$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \max Bus 52S2}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \max Bus 52S2}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,5 \cdot \left[\left(\frac{29300}{800} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$T_d = 0,27$

Dipilih $T_d = 0,25$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

☒ **Rele 52G1**

Manufaktur	: MITSUBISHI
Model	: CFP1 – A01D1
Kurva	: NI01 (Normal Inverse)
Rasio CT	: 2000/5
Isc kontribusi min STG-01	: 5,48 kA
Isc kontribusi max STG-01	: 7,48 kA
FLA STG-01	: 1422 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA STG-01} < I_{set} < 1,4 \cdot \text{FLA STG-01}$

$1,05 \cdot 1422 < I_{set} < 1,4 \cdot 1422$

$1493,1 < I_{set} < 1990,8$

$\frac{1493,1}{\frac{n_{CT}}{2000/5}} < \text{Tap} < \frac{1990,8}{\frac{n_{CT}}{2000/5}}$

$\frac{1493,1}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{1990,8}{2000/5}$

$3,7327 < \text{Tap} < 4,977$

Dipilih Tap 4 (*Range* 1 – 12 A dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 4 \times 2000/5 = 1600 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,9 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ kontribusi max STG-01}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ kontribusi max STG-01}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot 0,9 \cdot \left[\left(\frac{7480}{1600} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 2$$

Dipilih $T_d = 5,5$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \cdot \text{FLA STG-01} < I_{set} < 0,8 \cdot I_{sc \text{ kontribusi min STG-01}}$$

$$1,6 \cdot 1422 < I_{set} < 0,8 \cdot 5480$$

$$2275,2 < I_{set} < 4384$$

$$\frac{2275,2}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{4384}{n_{CT}}$$

$$\frac{2275,2}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{4384}{2000/5}$$

$$5,688 < \text{Tap} < 10,96$$

Dipilih Tap 8 A (*Range* 2 – 80 A, dengan *step* 1)

$$I_{set} = 8 \times 2000/5 = 3200 \text{ A}$$

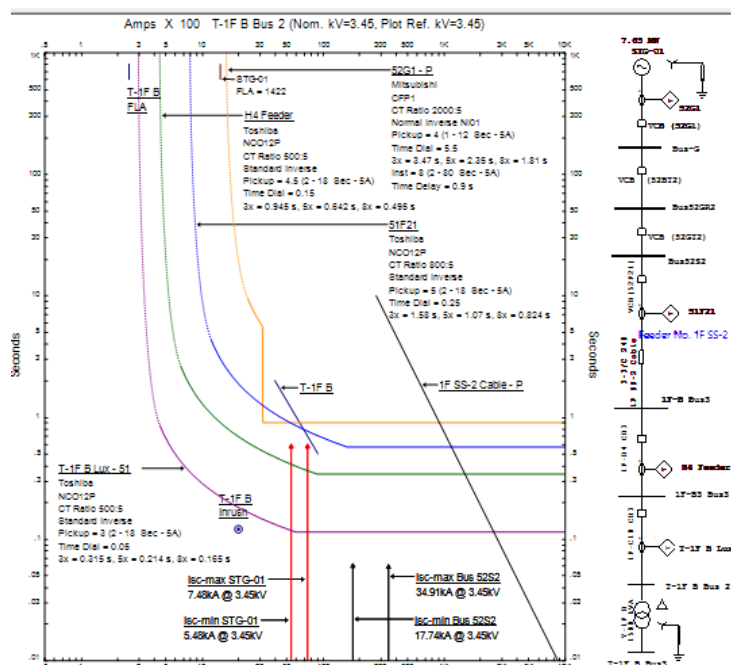
Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,9 detik

Dengan hasil perhitungan diatas, maka selanjutnya dilakukan *plotting* kurva arus dan waktu atau TCC pada *Star-Protective Device Coordination*. Data *resetting* rele dan hasil plot kurva TCC tipikal 2 ditunjukkan pada tabel 4.15 dan gambar 4.17.

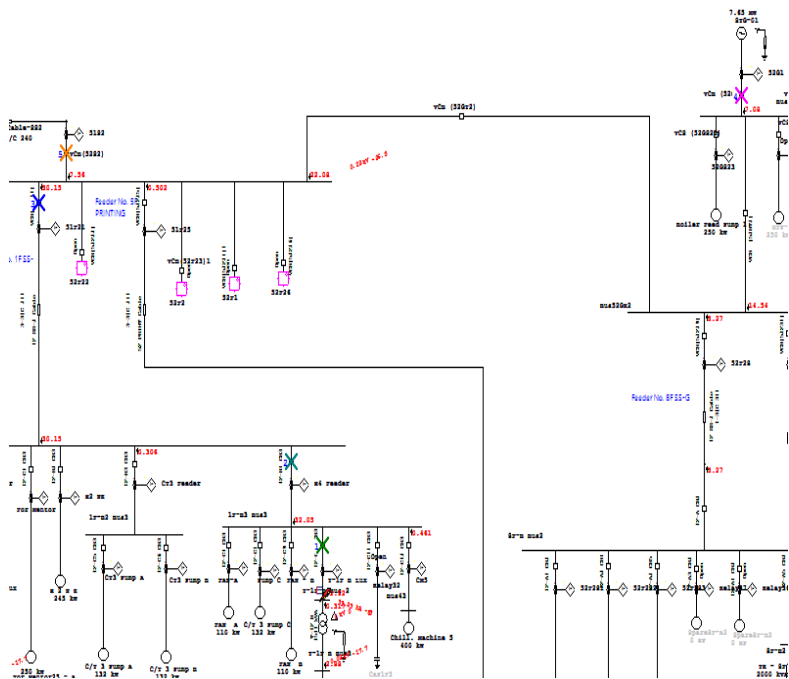
Tabel 4.15 Data *Resetting* Rele Tipikal 2

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
T-1F B Lux	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3
		<i>Time Dial</i>	0,05
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
H4 Feeder	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	4,5
		<i>Time Dial</i>	0,15
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	4
		<i>Time Dial</i>	5,5
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,9



Gambar 4.17 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 2

Setelah melakukan *plot* kurva setting rele pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi hasil *resetting* rele. Pada evaluasi ini yang diperhatikan yaitu urutan dan waktu kerja dari rele pengaman. Gambar 4.18 menunjukkan urutan kerja rele ketika terjadi gangguan dan gambar 4.19 menunjukkan waktu kerja atau *Sequence Of Operation Event* (*Sequence Viewer*) dari evaluasi yang dilakukan pada Tipikal 2.



Gambar 4.18 Data Urutan Kerja Rele Hasil *Resetting* Tipikal 2

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: T-1F B Bus 2

Data Rev.: Base Config: SFCL Date: 12-10-2016

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
113	T-1F B Lux	32.921	113		Phase - OC1 - 51
213	1F-C10 CB3		100		Tripped by T-1F B Lux Phase - OC1 - 51
340	H4 Feeder	32.053	340		Phase - OC1 - 51
440	1F-B4 CB3		100		Tripped by H4 Feeder Phase - OC1 - 51
567	51F21	30.147	567		Phase - OC1 - 51
667	VCB(52F21)		100		Tripped by 51F21 Phase - OC1 - 51
900	52G1	7.077	900		Phase - OC1 - 50
1000	VCB(52G1)		100		Tripped by 52G1 Phase - OC1 - 50
1228	51S2	7.564	1228		Phase - OC1 - 51
1328	VCB(52S2)		100		Tripped by 51S2 Phase - OC1 - 51

Gambar 4.19 *Sequence Viewer* Tipikal 2

Dari gambar 4.18 menunjukkan urutan kerja rele sudah sesuai dengan desain dan gambar 4.19 merupakan hasil laporan *Sequence Viewer* dari tipikal 2 yang dilakukan dengan cara memberi gangguan hubung singkat 3 fasa pada trafo T-1F B pada bus T-1F B Bus 2. Dari hasil laporan *Sequence Viewer*, dapat dilihat bahwa *setting* rele sudah tepat karena ketika terjadi hubung singkat maka rele T-1F B Lux bekerja di waktu 0,113 detik, rele H4 *Feeder* bekerja di waktu 0,34 detik, rele 51F21 bekerja di waktu 0,567 detik, rele 52G1 bekerja di 0,9 detik, dan rele 51S2 bekerja di 1,228 detik. *Grading time* antar rele sudah sesuai yaitu sebesar 0,2 – 0,4 detik.

4.4.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3

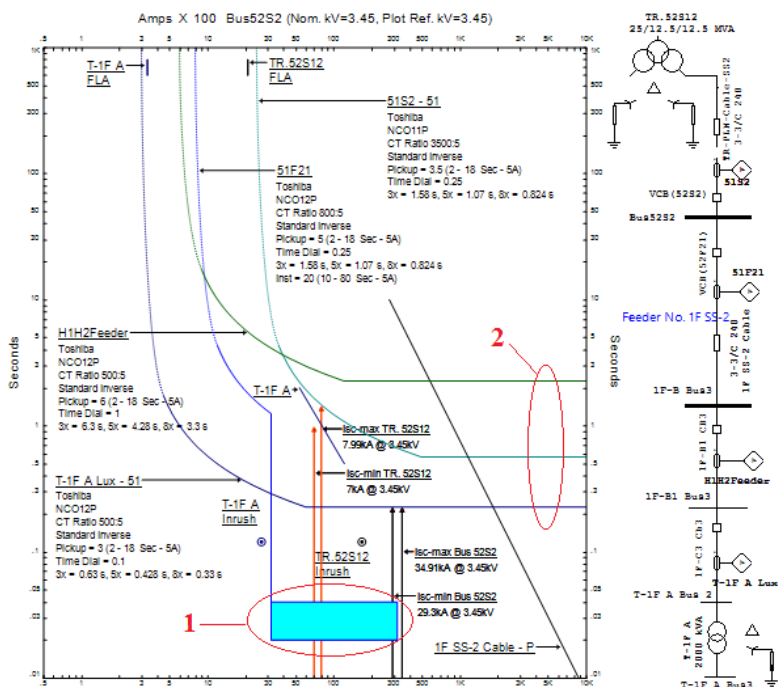
Tipikal 3 ini merupakan koordinasi sistem pengamanan dari tersier trafo 3 belitan TR. 52S12 dengan rating daya 12,5 MVA sampai dengan trafo T-1F A dengan rating daya 2000 kVA. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele 51S2, rele 51F21, rele H1H2 *Feeder*, dan rele T-1F A Lux.

Rele 51S2 melindungi trafo TR 52S12. Rele 51F21 melindungi bus 1F-B Bus 3, bus 52S2 dan *back up* rele sebelumnya. Rele H1H2 *Feeder* melindungi bus 1F-B1 Bus 3, bus 1F-B Bus 3 dan *back up* rele sebelumnya, Rele T-1F A Lux melindungi trafo T-1F A.

Single Line Diagram untuk tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.20. Data *existing* rele tipikal 3 dapat dilihat pada tabel 4.16. Sedangkan plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 3 dapat dilihat pada Gambar 4.21.

Tabel 4.16 Data *Existing* Rele Tipikal 3

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
T-1F A Lux	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3
		<i>Time Dial</i>	0,1
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
H1H2 Feeder	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	6
		<i>Time Dial</i>	1
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	20
		<i>Time Delay</i>	-
51S2	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-



Gambar 4.21 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 3

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 3, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, *setting instantaneous* rele 51F21 dapat mengakibatkan rele 51F21 aktif pada 0,04 detik.
2. Pada lingkaran nomor 2, time delay antar rele tidak sesuai standar yaitutidak diantara 0,2 – 0,4 detik. Selain itu terjadi *overlapping*, *setting* time delay antar rele juga kurang tepat, sehingga ketika terjadi hubung singkat urutan rele yang aktif adalah rele 51F21 karena *setting instantaneous* 0,04 detik, rele T-1F A Lux, rele 51S2 dan rele H1H2 Feeder aktif paling terakhir dengan waktu *delay* melebihi waktu standar.

Akibat adanya penambahan *Hybrid SFCI* dan berdasarkan hasil analisa koordinasi rele pada kondisi *existing* tipikal 3 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

☑ **Rele T-1F A Lux**

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO12P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 500/5
FLA Primer Trafo T-1F A	: 334,7 A
Isc min Bus 1F-B1 Bus3	: 17,14 kA (3,45 kV)
Isc max Bus 1F-B1 Bus3	: 28,02 kA (3,45 kV)
Isc max Bus T-1F A Bus3	: 42,46 kA (0,38 kV)
Konversi ke sisi primer	: $(0,38/3,45) \times 42,46 = 4,68 \text{ kA}$

Time Overcurrent Pickup

1,05 . FLA Primer TR. T-1F A < I_{set} < 1,4 . FLA Primer TR. T-1F A

1,05 . 334,7 < I_{set} < 1,4 . 334,7

351,435 < I_{set} < 468,58

$$\frac{351,435}{\frac{n_{CT}}{500/5}} < \text{Tap} < \frac{468,58}{\frac{n_{CT}}{500/5}}$$

$$\frac{351,435}{500/5} < \text{Tap} < \frac{468,58}{500/5}$$

$$3,514 < \text{Tap} < 4,685$$

Dipilih Tap 4 (*Range 2 – 18 A*)

$$I_{set} = 4 \times 500/5 = 400 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,1 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 1F-B1 Bus3}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 1F-B1 Bus3}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,1 \cdot \left[\left(\frac{28020}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,06$$

Dipilih $T_d = 0,05$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

☑ Rele H1H2 Feeder

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO12P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 500/5
Isc min Bus 1F-B Bus3	: 17,14 kA
Isc max Bus 1F-B Bus3	: 28,02 kA
FLA H1H2 Feeder	: 442,52 A

Time Overcurrent Pickup

1,05 . FLA H1H2 Feeder < I_{set} < 1,4 . FLA H1H2 Feeder

1,05 . 442,52 < I_{set} < 1,4 . 442,52

464,646 < I_{set} < 619,528

$$\frac{464,646}{\frac{n_{CT}}{500/5}} < \text{Tap} < \frac{619,528}{\frac{n_{CT}}{500/5}}$$

$$\frac{464,646}{500/5} < \text{Tap} < \frac{619,528}{500/5}$$

$$4,646 < \text{Tap} < 6,195$$

Dipilih Tap 5 (Range 2 – 18 A)

$$I_{\text{set}} = 5 \times 500/5 = 500 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 1F-B Bus3}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 1F-B Bus3}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \cdot \left[\left(\frac{28020}{500} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,17$$

Dipilih Td = 0,15

Instantaneous Pickup : Disable / Lock

☑ Rele 51F21

Manufaktur : TOSHIBA
 Model : NCO12P – 02AK52
 Kurva : Standard Inverse
 Rasio CT : 800/5
 Isc min Bus 52S2 : 17,74 kA
 Isc max Bus 52S2 : 29,3 kA
 FLA Bus 1F-B Bus3 : 632 A

Time Overcurrent Pickup

1,05 . FLA Bus 1F-B Bus3 < I_{set} < 1,4 . FLA Bus 1F-B Bus3

1,05 . 632 < I_{set} < 1,4 . 632

663,6 < I_{set} < 884,8

$\frac{663,6}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{884,8}{n_{CT}}$

$\frac{663,6}{800/5} < \text{Tap} < \frac{884,8}{800/5}$

4,1475 < Tap < 5,53

Dipilih Tap 5 (Range 2 – 18 A)

I_{set} = 5 x 800/5 = 800 A

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 52S2}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ max Bus 52S2}}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,5 \cdot \left[\left(\frac{29300}{800} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,27$$

$$\text{Dipilih } T_d = 0,25$$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

☑ Rele 51S2

Manufaktur	: TOSHIBA
Model	: NCO11P – 02AK52
Kurva	: Standard Inverse
Rasio CT	: 3500/5
Isc min Kontribusi Tersier TR. 52S12	: 7 kA
Isc max Kontribusi Tersier TR. 52S12	: 7,97 kA
FLA Tersier TR. 52S12	: 2092 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA Tersier TR. 52S12} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Tersier TR. 52S12}$$

$$1,05 \cdot 2092 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 2092$$

$$2196,6 < I_{\text{set}} < 2928,8$$

$$\frac{2196,6}{\frac{n_{CT}}{3500/5}} < \text{Tap} < \frac{2928,8}{\frac{n_{CT}}{3500/5}}$$

$$\frac{2196,6}{3500/5} < \text{Tap} < \frac{2928,8}{3500/5}$$

$$3,138 < \text{Tap} < 4,184$$

$$\text{Dipilih Tap 3,5 (Range 2 – 18 A)}$$

$$I_{\text{set}} = 3,5 \times 3500/5 = 2450 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$\text{Dipilih waktu operasi (t) = 0,7 detik}$$

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{\text{Isc max Kontribusi Tersier TR. 52S12}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{\text{Isc max Kontribusi Tersier TR. 52S12}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,7 \cdot \left[\left(\frac{7970}{2450} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

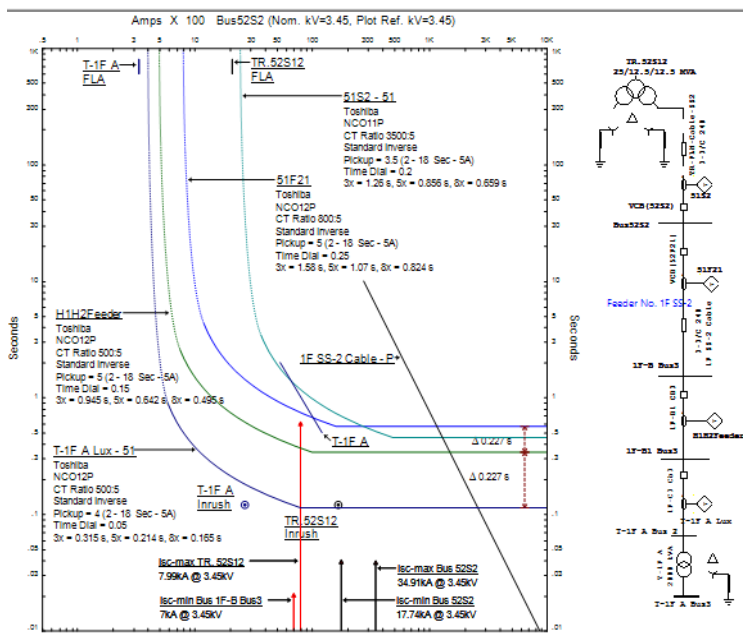
$T_d = 0,12$
Dipilih $T_d = 0,2$

Instantaneous Pickup: Disable /Lock

Dengan hasil perhitungan diatas, maka selanjutnya dilakukan *plotting* kurva arus dan waktu atau TCC pada *Star-Protective Device Coordination*. Data *resetting* rele dan hasil plot kurva TCC tipikal 3 ditunjukkan pada tabel 4.17 dan gambar 4.22.

Tabel 4.17 Data *Resetting* Rele Tipikal 3

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
T-1F A Lux	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	4
		<i>Time Dial</i>	0,05
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
H1H2 Feeder	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time Dial</i>	0,15
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5
		<i>Time Dial</i>	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-
51S2	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,2
		<i>Pickup Highset</i>	-
		<i>Time Delay</i>	-



Gambar 4.22 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 3

Setelah melakukan *plot* kurva setting rele pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi hasil *resetting* rele. Pada evaluasi ini yang diperhatikan yaitu urutan dan waktu kerja dari rele pengaman. Gambar 4.23 menunjukkan urutan kerja rele ketika terjadi gangguan dan gambar 4.24 menunjukkan waktu kerja atau *Sequence Of Operation Event* (*Sequence Viewer*) dari evaluasi yang dilakukan pada Tipikal 3

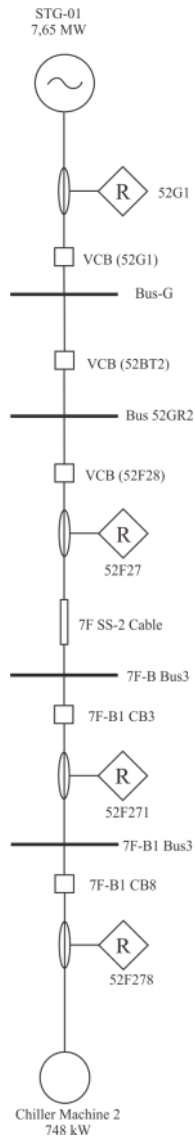
Dari gambar 4.23 menunjukkan urutan kerja rele sudah sesuai dengan desain dan gambar 4.24 merupakan hasil laporan *Sequence Viewer* dari tipikal 3 yang dilakukan dengan cara memberi gangguan hubung singkat 3 fasa pada trafo T-1F A pada bus T-1F A Bus 2. Dari hasil laporan *Sequence Viewer*, dapat dilihat bahwa *setting* rele sudah tepat karena ketika terjadi hubung singkat maka rele T-1F A Lux bekerja di waktu 0,113 detik, rele H1H2 *Feeder* bekerja di waktu 0,34 detik, rele 51F21 bekerja di waktu 0,567 detik, rele 52G1 bekerja di 0,9 detik, dan rele 51S2 bekerja di 1,228 detik. *Grading time* antar rele sudah sesuai yaitu sebesar 0,2 – 0,4 detik.

4.4.5 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 4

Tipikal 4 ini merupakan koordinasi sistem pengamanan dari generator STG-01 dengan kapasitas daya 7,65 MW sampai dengan motor Chiller Machine 2 dengan kapasitas 748 kW. Rele – rele yang di koordinasikan antara lain rele 52G1, rele 52F27, rele 52F271, dan rele 52F278.

Rele 52G1 melindungi generator STG-01. Rele 52F27 melindungi bus 7F-B Bus 3, bus 52GR2 dan *back up* rele sebelumnya. Rele 52F271 melindungi bus 7F-B1 Bus 3, bus 7F-B Bus 3 dan *back up* rele sebelumnya. Rele 52F278 melindungi motor Chiller Machine 2.

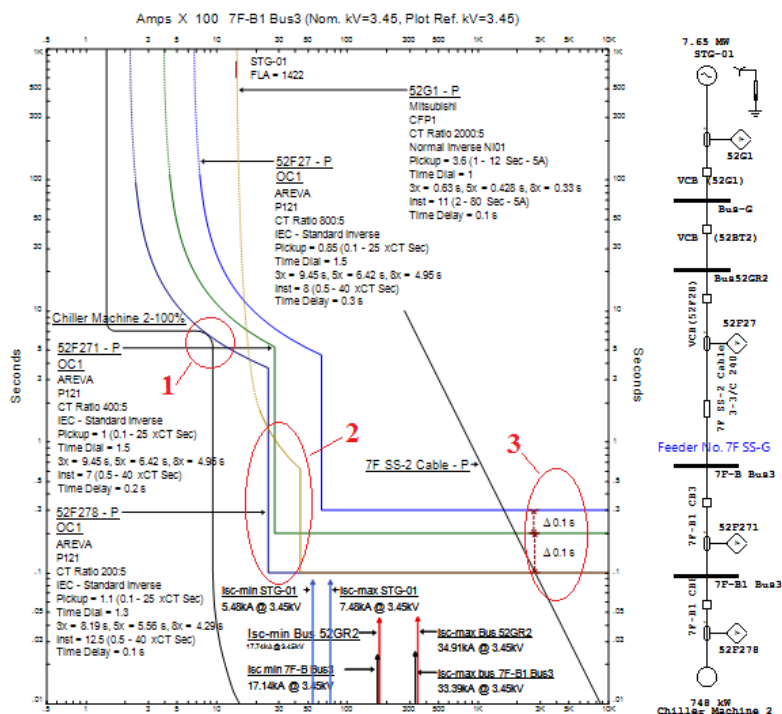
Single Line Diagram untuk tipikal 4 dapat dilihat pada gambar 4.25. Data *existing* rele tipikal 4 dapat dilihat pada tabel 4.18. Sedangkan plot rele kondisi *existing* untuk tipikal 4 dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4.25 *Single Line Diagram Koordinasi Rele Tipikal 4*

Tabel 4.18 Data *Existing* Rele Tipikal 4

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
52F278	200/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,1
		<i>Time Dial</i>	1,3
		<i>Pickup Highset</i>	12,5
		<i>Time Delay</i>	0,1
52F271	400/5	<i>Pickup Lowset</i>	1
		<i>Time Dial</i>	1,5
		<i>Pickup Highset</i>	7
		<i>Time Delay</i>	0,2
52F27	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	0,85
		<i>Time Dial</i>	1,5
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,3
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,6
		<i>Time Dial</i>	1
		<i>Pickup Highset</i>	11
		<i>Time Delay</i>	0,1



Gambar 4.26 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 4

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 4, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva invers rele 52F278 masih menyentuh kurva *starting* motor, sehingga motor tidak akan bisa *start*.
2. Pada lingkaran nomor 2, kurva rele arus lebih dari generator, yaitu rele 52G1, berpotongan dengan kurva rele yang lain dan memiliki waktu *delay* yang lebih cepat dibanding rele 52F27. Hal ini dapat mengakibatkan rele 52G1 akan aktif lebih dahulu daripada rele 52F271. Selain itu *setting time delay* rele 52G1 dan rele 52F278 bernilai sama yaitu 0,1 detik, hal ini mengakibatkan kedua rele akan aktif bersamaan.
3. Pada lingkaran nomor 3, time delay antar rele tidak sesuai standar yaitu tidak diantara 0,2 – 0,4 detik. Selain itu *setting*

time delay antar rele juga kurang tepat, sehingga ketika terjadi hubung singkat urutan rele yang aktif adalah rele 52F278 dan rele 52G1 aktif bersamaan, rele 52F271, dan rele 52F27 aktif paling terakhir.

Akibat adanya penambahan Hybrid SFCL dan berdasarkan hasil analisa koordinasi rele pada kondisi *existing* tipikal 4 diatas, maka diperlukan *resetting* koordinasi rele pengaman. Berikut perhitungannya :

☑ **Rele 52F278**

Manufaktur	: AREVA
Model	: P121
Kurva	: IEC – Standard Inverse
Rasio CT	: 200/5
Isc min Bus 7F-B1 Bus3	: 17,14 kA
Isc max Bus 7F-B1 Bus3	: 28,13 kA
FLA Motor	: 151,4 A
Istarting Motor	: 984,1 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA Motor} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Motor}$$

$$1,05 \cdot 151,4 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 151,4$$

$$158,97 < I_{\text{set}} < 211,96$$

$$\frac{158,97}{\text{Primer CT}} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{211,96}{\text{Primer CT}} \text{ In}$$

$$\frac{158,97}{200} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{211,96}{200} \text{ In}$$

$$0,7948 \text{ In} < \text{Tap} < 1,0598 \text{ In}$$

Dipilih Tap 0,95(Range 0,1 – 25 In dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,97 \times 200 = 194 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = waktu *starting* motor = 7 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1,3 \cdot I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{1,3 \cdot I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{7 \cdot \left[\left(\frac{1,3 \cdot 984,1}{190} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 1,94$$

$$\text{Dipilih } T_d = 1,5$$

Instantaneous Pickup

$$LRC < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot I_{\text{sc min Bus 7F-B1 Bus3}}$$

$$984,1 < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot 17140$$

$$984,1 < I_{\text{set}} < 17140$$

$$\frac{984,1}{\text{Primer CT}} I_n < \text{Tap} < \frac{17140}{\text{Primer CT}} I_n$$

$$\frac{984,1}{200} I_n < \text{Tap} < \frac{17140}{200} I_n$$

$$4,9205 I_n < \text{Tap} < 85,7 I_n$$

Dipilih Tap 8 I_n (Range 0,5 – 40 I_n dengan step 0,01)

$$I_{\text{set}} = 8 \times 200 = 1600 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

☒ **Rele 52F271**

Manufaktur	: AREVA
Model	: P121
Kurva	: IEC – Standard Inverse
Rasio CT	: 400/5
Isc min Bus 7F-B Bus 3	: 17,14 kA
Isc max Bus 7F-B Bus 3	: 28,13 kA
FLA Bus 7F-B1 Bus3	: 375,17 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA Bus 7F-B1 Bus3} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Bus 7F-B1 Bus3}$$

$$1,05 \cdot 375,17 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 375,17$$

$$393,9285 < I_{\text{set}} < 525,238$$

$$\frac{393,9285}{\text{Primer CT}} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{525,238}{\text{Primer CT}} \text{ In}$$

$$\frac{393,9285}{400} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{525,238}{400} \text{ In}$$

$$0,9848 \text{ In} < \text{Tap} < 1,313 \text{ In}$$

Dipilih Tap 1 In (Range 0,1 – 25 In dengan step 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1 \text{ In} \times 400 = 400 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 7F-B Bus 3}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 7F-B Bus 3}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,3 \cdot \left[\left(\frac{28130}{400} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,19$$

Dipilih $T_d = 1,2$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \cdot \text{FLA Bus 7F-B1 Bus 3} < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot I_{\text{sc min Bus 7F-B Bus 3}}$$

$$1,6 \cdot 375,17 < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot 17140$$

$$600,272 < I_{\text{set}} < 13712$$

$$\frac{600,272}{\text{Primer CT}} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{13712}{\text{Primer CT}} \text{ In}$$

$$\frac{600,272}{400} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{13712}{400} \text{ In}$$

$$1,5 \text{ In} < \text{Tap} < 34,28 \text{ In}$$

Dipilih Tap 5 In (Range 0,5 – 40 In dengan step 0,01)

$$I_{\text{set}} = 5 \text{ In} \times 400 = 2000 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

☒ **Rele 52F27**

Manufaktur	: AREVA
Model	: P121
Kurva	: IEC – Standard Inverse
Rasio CT	: 800/5
Isc min Bus 52GR2	: 17,74 kA
Isc max Bus 52GR2	: 29,3 kA
FLA Bus 7F-B Bus 3	: 798 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \cdot \text{FLA Bus 7F-B Bus 3} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA Bus 7F-B Bus 3}$

$1,05 \cdot 798 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 798$

$837,9 < I_{\text{set}} < 1117,2$

$$\frac{837,9}{\text{Primer CT}} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{1117,2}{\text{Primer CT}} \text{ In}$$

$$\frac{837,9}{800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{1117,2}{800} \text{ In}$$

$$1,047 \text{ In} < \text{Tap} < 1,3965 \text{ In}$$

Dipilih Tap 1,05 In (*Range* 0,1 – 25 In dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,05 \text{ In} \times 800 = 840 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 52GR2}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times T_d$$

$$T_d = \frac{t \cdot \left[\left(\frac{I_{\text{sc max Bus 52GR2}}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{0,5 \cdot \left[\left(\frac{29300}{840} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 0,26$$

Dipilih $T_d = 0,85$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \cdot \text{FLA Bus 7F-B Bus 3} < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot \text{Isc min Bus 52GR2}$$

$$1,6 \cdot 798 < I_{\text{set}} < 0,8 \cdot 17740$$

$$1276,8 < I_{\text{set}} < 14192$$

$$\frac{1276,8}{\text{Primer CT}} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{14192}{\text{Primer CT}} \text{ In}$$

$$\frac{1276,8}{800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{14192}{800} \text{ In}$$

$$1,596 \text{ In} < \text{Tap} < 17,74 \text{ In}$$

Dipilih Tap 3 In (*Range* 0,5 – 40 In dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 3 \text{ In} \times 800 = 2400 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

☒ **Rele 52G1**

Manufaktur	: MITSUBISHI
Model	: CFP1 – A01D1
Kurva	: NI01 (Normal Inverse)
Rasio CT	: 2000/5
Isc kontribusi min STG-01	: 5,48 kA
Isc kontribusi max STG-01	: 7,48 kA
FLA STG-01	: 1422 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \cdot \text{FLA STG-01} < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot \text{FLA STG-01}$$

$$1,05 \cdot 1422 < I_{\text{set}} < 1,4 \cdot 1422$$

$$1493,1 < I_{\text{set}} < 1990,8$$

$$\frac{1493,1}{n_{\text{CT}}} < \text{Tap} < \frac{1990,8}{n_{\text{CT}}}$$

$$\frac{1493,1}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{1990,8}{2000/5}$$

$$3,7327 < \text{Tap} < 4,977$$

Dipilih Tap 4 (*Range* 1 – 12 A dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 4 \times 2000/5 = 1600 \text{ A}$$

Time Dial

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

Dipilih waktu operasi (t) = 0,9 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I_{sc \text{ kontribusi max STG-01}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times \frac{T_d}{10}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot t \cdot \left[\left(\frac{I_{sc \text{ kontribusi max STG-01}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = \frac{10 \cdot 0,9 \cdot \left[\left(\frac{7480}{1600} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T_d = 2$$

Dipilih $T_d = 2,5$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \cdot \text{FLA STG-01} < I_{set} < 0,8 \cdot I_{sc \text{ kontribusi min STG-01}}$$

$$1,6 \cdot 1422 < I_{set} < 0,8 \cdot 5480$$

$$2275,2 < I_{set} < 4384$$

$$\frac{2275,2}{n_{CT}} < \text{Tap} < \frac{4384}{n_{CT}}$$

$$\frac{2275,2}{2000/5} < \text{Tap} < \frac{4384}{2000/5}$$

$$5,688 < \text{Tap} < 10,96$$

Dipilih Tap 8 A (*Range* 2 – 80 A, dengan *step* 1)

$$I_{set} = 8 \times 2000/5 = 3200 \text{ A}$$

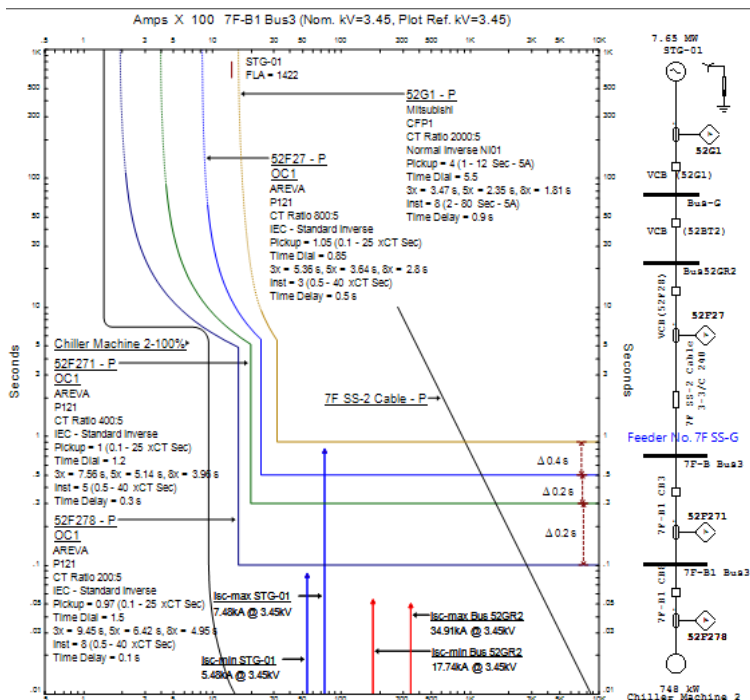
Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,9 detik

Dengan hasil perhitungan diatas, maka selanjutnya dilakukan *plotting* kurva arus dan waktu atau TCC pada *Star-Protective Device Coordination*. Data *resetting* rele dan hasil plot kurva TCC tipikal 4 ditunjukkan pada tabel 4.19 dan gambar 4.27.

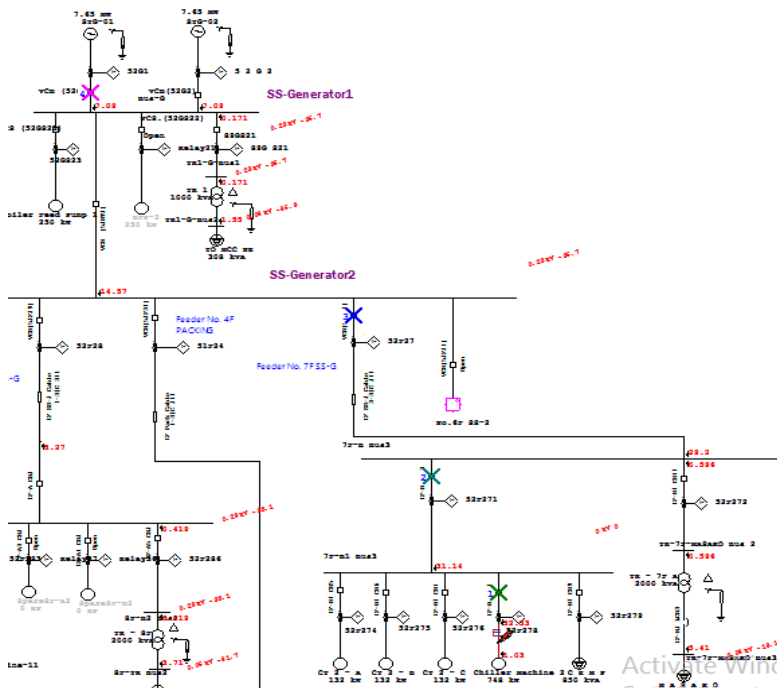
Tabel 4.19 Data *Resetting* Rele Tipikal 4

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
52F278	200/5	<i>Pickup Lowset</i>	0,97
		<i>Time Dial</i>	1,5
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,1
52F271	400/5	<i>Pickup Lowset</i>	1
		<i>Time Dial</i>	1,2
		<i>Pickup Highset</i>	5
		<i>Time Delay</i>	0,3
52F27	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,05
		<i>Time Dial</i>	0,85
		<i>Pickup Highset</i>	3
		<i>Time Delay</i>	0,5
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	4
		<i>Time Dial</i>	5,5
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,9



Gambar 4.27 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 4

Setelah melakukan *plot* kurva setting rele pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi hasil *resetting* rele. Pada evaluasi ini yang diperhatikan yaitu urutan dan waktu kerja dari rele pengaman. Gambar 4.28 menunjukkan urutan kerja rele ketika terjadi gangguan dan gambar 4.29 menunjukkan waktu kerja atau *Sequence Of Operation Event* (*Sequence Viewer*) dari evaluasi yang dilakukan pada Tipikal 4.



Gambar 4.28 Data Urutan Kerja Rele Hasil *Resetting* Tipikal 4

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between Chiller Machine 2 & CT89. Adjacent bus: 7F-B1 Bus3

Data Rev.: Base Config: SFCL Date: 12-10-2016

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	52F278	32.329	100		Phase - OC1 - 50
200	7F-B1 CB8		100		Tripped by 52F278 Phase - OC1 - 50
300	52F271	31.138	300		Phase - OC1 - 50
400	7F-B1 CB3		100		Tripped by 52F271 Phase - OC1 - 50
500	52F27	29.205	500		Phase - OC1 - 50
600	VCB(52F28)		100		Tripped by 52F27 Phase - OC1 - 50
900	52G1	7.09	900		Phase - OC1 - 50
1000	VCB (52G1)		100		Tripped by 52G1 Phase - OC1 - 50
1226	51S2	7.578	1226		Phase - OC1 - 51
1326	VCB(52S2)		100		Tripped by 51S2 Phase - OC1 - 51

Gambar 4.29 *Sequence Viewer* Tipikal 4

Dari gambar 4.28 menunjukkan urutan kerja rele sudah sesuai dengan desain dan gambar 4.29 merupakan hasil laporan *Sequence Viewer* dari tipikal 4 yang dilakukan dengan cara memberi gangguan hubung singkat 3 fasa pada *chiller machine* 2. Dari hasil laporan *Sequence Viewer*, dapat dilihat bahwa *setting* rele sudah tepat karena ketika terjadi hubung singkat maka rele 52F278 bekerja di waktu 0,1 detik, rele 52F271 bekerja di waktu 0,3 detik, rele 52F27 bekerja di waktu 0,5 detik, rele 52G1 bekerja di 0,9 detik, dan rele 51S2 bekerja di 1,226 detik. *Grading time* antar rele sudah sesuai yaitu sebesar 0,2 – 0,4 detik.

Perbandingan *setting* rele sebelum dan sesudah pemasangan *hybrid* SFCL untuk ke empat tipikal ditunjukkan pada tabel 4.20, tabel 4.21, tabel 4.22, dan tabel 4.23. Dari tabel tersebut dapat dianalisa bahwa perubahan *setting* rele arus lebih fasa hanya pada *setting time dial* dan *instantaneous*. Hal ini karena nilai arus hubung singkat setelah pemasangan *Hybrid* SFCL menjadi lebih kecil dan karena karakteristik rele.

Tabel 4.20 Data Perbandingan *Setting* Rele Tipikal 1 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan *Hybrid* SFCL

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
51F225A	150/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,1	1,1
		<i>Time Dial</i>	12	22
		<i>Pickup Highset</i>	17	8
		<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
51F225	300/5	<i>Pickup Lowset</i>	2,2	2
		<i>Time Dial</i>	6,5	9
		<i>Pickup Highset</i>	40	20
		<i>Time Delay</i>	0,1	0,3
51F22	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	6	7
		<i>Time Dial</i>	0,4	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	30	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
51S1	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,3	0,3
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-

Tabel 4.21 Data Perbandingan *Setting* Rele Tipikal 2 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan *Hybrid SFCL*

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
T-1F B LUX	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	2	3
		<i>Time Dial</i>	0,1	0,05
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
H4 FEEDER	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	6	4,5
		<i>Time Dial</i>	1	0,15
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5	5
		<i>Time Dial</i>	0,25	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	20	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,6	4
		<i>Time Dial</i>	1	5,5
		<i>Pickup Highset</i>	11	8
		<i>Time Delay</i>	0,1	0,9

Tabel 4.22 Data Perbandingan *Setting* Rele Tipikal 3 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan *Hybrid* SFCL

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
T-1F A LUX	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3	4
		<i>Time Dial</i>	0,1	0,05
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
H1H2 FEEDER	500/5	<i>Pickup Lowset</i>	6	5
		<i>Time Dial</i>	1	0,15
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
51F21	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	5	5
		<i>Time Dial</i>	0,25	0,25
		<i>Pickup Highset</i>	20	-
		<i>Time Delay</i>	-	-
51S2	3500/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,5	3,5
		<i>Time Dial</i>	0,25	0,2
		<i>Pickup Highset</i>	-	-
		<i>Time Delay</i>	-	-

Tabel 4.23 Data Perbandingan *Setting* Rele Tipikal 4 Sebelum Dan Sesudah Pemasangan *Hybrid SFCL*

<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	Tanpa Hybrid SFCL	Dengan Hybrid SFCL
52F278	200/5	<i>Pickup Lowset</i>	1,1	0,97
		<i>Time Dial</i>	1,3	1,5
		<i>Pickup Highset</i>	12,5	8
		<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
52F271	400/5	<i>Pickup Lowset</i>	1	1
		<i>Time Dial</i>	1,5	1,2
		<i>Pickup Highset</i>	7	5
		<i>Time Delay</i>	0,2	0,3
52F27	800/5	<i>Pickup Lowset</i>	0,85	1,05
		<i>Time Dial</i>	1,5	0,85
		<i>Pickup Highset</i>	8	3
		<i>Time Delay</i>	0,3	0,5
52G1	2000/5	<i>Pickup Lowset</i>	3,6	4
		<i>Time Dial</i>	1	5,5
		<i>Pickup Highset</i>	11	8
		<i>Time Delay</i>	0,1	0,9

-Halaman ini sengaja dikosongkan-

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa penggunaan *Hybrid Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) pada sistem pengamanan pada PT Ajinomoto Indonesia, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Arus hubung singkat 3 fasa yang melebihi dari kapasitas *existing switchgear* terjadi pada seluruh bus. Arus hubung singkat pada bus 52S1 bernilai 51,1 kA, bus 52S2 bernilai 67 kA, bus 52GR2 bernilai 67 kA, bus – G bernilai 67 kA.
2. Pada Tugas Akhir ini SFCL yang digunakan adalah *Hybrid SFCL*. Pada *Hybrid SFCL*, Superkonduktor difungsikan sebagai *sensing* ketika ada arus hubung singkat pada sistem untuk mengaktifkan *coil*. *Fast switch* difungsikan sebagai saklar untuk mengalirkan arus hubung singkat menuju *Current Limiting Reactor* (CLR) dengan memanfaatkan kenaikan impedansi dari superkonduktor.
3. Waktu *switch* yang dibutuhkan superkonduktor adalah 0.001 detik sedangkan waktu operasi yang dibutuhkan untuk mereduksi arus hubung singkat sebesar 0.002 detik.
4. Nilai kontribusi arus hubung singkat 3 fasa dari trafo TR. 52S12 pada bus 52S1 sebelum pemasangan *Hybrid SFCL* sebesar 41,26 kA. Setelah pemasangan *Hybrid SFCL* nilai arus hubung singkat 3 fasa sebesar 25,15 kA dengan nilai reaktansi CLR sebesar 0,028 ohm untuk SFCL 1.
5. Nilai kontribusi arus hubung singkat 3 fasa dari trafo TR. 52S12 pada bus 52S2 sebelum pemasangan *Hybrid SFCL* sebesar 40,13 kA. Setelah pemasangan *Hybrid SFCL* nilai arus hubung singkat 3 fasa sebesar 7,999 kA dengan nilai reaktansi CLR sebesar 0,2 ohm untuk SFCL 2.
6. Arus hubung singkat 3 fasa setelah pemasangan *Hybrid SFCL* pada bus 52S1 menjadi bernilai 35 kA, bus 52S2 menjadi bernilai 34,9 kA, bus 52GR2 menjadi bernilai 34,9 kA, bus – G menjadi bernilai 34,9 kA.
7. Penambahan *Hybrid SFCL* mengakibatkan arus hubung singkat turun, hal ini mengakibatkan perubahan *setting* rele arus lebih terutama pada *setting time dial* dan *instantaneous*.

8. Pemasangan *Hybrid SFCL* sebagai pengaman dan pereduksi arus hubung singkat karena penambahan sumber daya dan interkoneksi jaringan adalah cara yang tepat karena sistem tersebut menghemat biaya dan tidak perlu mengganti peralatan *existing switchgear, circuit breaker* dan kabel yang telah terpasang pada PT. Ajinomoto Indonesia.

5.2. Saran

Diharapkan studi ini dapat dikembangkan sebagai fungsi yang lain dengan menggunakan *software* lain dan dengan metode lain agar di dapat hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R Wahyudi, Ir, *Diktat Kuliah Sistem Pengaman Tenaga Listrik*, 2008.
- [2] Ontoseno Penangsang. Prof, *Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga* 2, 2008.
- [3] Stevenson, Jr., William D, “*Analisis Sistem Tenaga Listrik*”, Diterjemahkan oleh Ir. Kamal Idris, Penerbit Erlangga, Jakarta, Edisi Keempat, 1983.
- [4] IEEE std 242-2001, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Cordination of Industrial and Commercial Power System*”, The Institute of Electrical and Electronic Engineering, Inc, New York, Ch 15, 2001.
- [5] Steven M. Blair, “*Current–Time Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiters*” in IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.22, No. 2, APRIL 2012
- [6] Hyun, Ok-Bae, “*Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue*”, in IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.19, No. 3, JUNE 2009
- [7] K. J. Min, ”The Application of Fault Current Limiter at Icheon Substation in Korea”, in International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, China, 2011
- [8] Ye, Lin, A.M. Campbell, ”*Case Study of HTS Resistive Superconducting Fault Current Limiter In Electrical Distribution Systems*”, in Science Direct UK 2006.
- [9] Lim, Sung-hun, “*Analysis on Protection Coordination of Hybrid SFCL Witch Protective Devices in a Power Distribution System*”, in IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.21, No. 3, JUNE 2011.
- [10] *Superconducting Fault Current Limiter* : Technology Watch 2009. EPRI - 1017793, Palo Alto, Ca : 2009.
- [11] B. W. Lee, K. B. Park, J. Sim, “*Study and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters*”,in IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.18, No. 2, JUNE 2008.
- [12] Lazar. Irwin , *Electrical System Analysis and Design for Industrial Plants*.

-Halaman ini sengaja dikosongkan-

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Bagus Wahyu Santoso, dilahirkan pada 26 Agustus 1991 di Mojokerto namun berdomisili di Surabaya. Penulis menempuh pendidikan di SDN Ngagel Rejo II Surabaya pada tahun 1997, SMPN 12 Surabaya pada tahun 2003, SMAN 20 Surabaya pada tahun 2006 dan D3 Teknik Elektro FTI – ITS Surabaya pada tahun 2009. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan untuk jenjang sarjana pada tahun 2014. Pendidikan sarjana ditempuh di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di jurusan Teknik Elektro dengan konsentrasi bidang studi Sistem Tenaga. Pada tahun 2017 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjana. Untuk menghubungi penulis dapat melalui email di baguswahyusantoso@gmail.com.

-Halaman ini sengaja dikosongkan-